KUANTUM ÇAĞI

Yeni Fizik Bize Nasıl Bir Gelecek Vaat Ediyor?

Brian Clegg

Çeviren: Samet Öksüz

SAY

KUANTUM ÇAĞI

Brian Clegg
Cambridge Üniversitesi'nde fizik okudu ve evrenin en tuhaf yönlerini sıradan okurun anlayabileceği hale getirmekte uzmanlaştı. www.popularscience.co.uk adresli sitenin editörüdür ve Royal Society of Arts'ın bir üyesidir. *Build Your Own Time Machine, The Universe Inside You, Dice World* ve *Introducing Infinity: A Graphic Guide* adlı kitapların yazarıdır.

Samet Öksüz
20 Haziran 1984'te Trabzon'da doğdu. 2009 yılında ODTÜ Moleküler Biyoloji ve Genetik bölümünden mezun oldu. Hacettepe Üniversitesi Temel Onkoloji Anabilim Dalı'nda, Cincinnati Üniversitesi'nde İmmünoloji alanında yüksek lisans eğitimi aldı. Cincinnati'de yaşıyor. *Zafer Sarhoşluğu* (Say Yayınları, 2014) ve *İkinci Dünya Savaşı* (Say Yayınları, 2016) başlıklarını taşıyan iki çevirisi var.

KUANTUM ÇAĞI

Yeni Fizik Bize Nasıl Bir Gelecek Vaat Ediyor?

Brian Clegg

İngilizceden çeviren:
Samet Öksüz

SAY

Say Yayınları
Popüler Bilim

Kuantum Çağı: Yeni Fizik Bize Nasıl Bir Gelecek Vaat Ediyor? / Brian Clegg
Özgün adı: *The Quantum Age: How the Physics of the Very Small Has Transformed Our Lives*

© 2014, Brian Clegg

Türkçe yayın hakları The Marsh Agency Ltd. ve Anatolialit Ajans aracılığıyla
© Say Yayınları
Bu eserin tüm hakları saklıdır. Yayınevinden yazılı izin alınmaksızın kısmen veya tamamen alıntı yapılamaz, hiçbir şekilde kopyalanamaz, çoğaltılamaz ve yayımlanamaz.

ISBN 978-605-02-0527-5
Sertifika no: 10962

İngilizceden çeviren: Samet Öksüz
Yayın koordinatörü: Levent Çeviker
Editör: Sinan Köseoğlu
Sayfa düzeni: Mehmet İlhan Kaya
Kapak tasarımı: Artemis İren

Baskı: Lord Matbaacılık ve Kâğıtçılık
Topkapı–İstanbul
Tel.: (0212) 674 93 54
Matbaa sertifika no: 22858

1. baskı: Say Yayınları, 2016

Say Yayınları
Ankara Cad. 22 / 12 • TR-34110 Sirkeci-İstanbul
Tel.: (0212) 512 21 58 • Faks: (0212) 512 50 80
www.sayyayincilik.com • e-posta: say@sayyayincilik.com
www.facebook.com/sayyayinlari • www.twitter.com/sayyayinlari

Genel dağıtım: Say Dağıtım Ltd. Şti.
Ankara Cad. 22 / 4 • TR-34110 Sirkeci-İstanbul
Tel.: (0212) 528 17 54 • Faks: (0212) 512 50 80
internet satış: www.saykitap.com • e-posta: dagitim@saykitap.com

İÇİNDEKİLER

Giriş 9

1. Kuantuma Giriş 13
2. Kuantum Doğası 35
3. Elektron Âlemi 51
4. KED 83
5. Işık ve Sihir 115
6. Süper Işınlar 127
7. Işığı Kullanmak 149
8. Direnç Faydasızdır 169
9. Havalanan Trenler ve Soğuk SQUID 187
10. Ürkütücü Karmaşıklık 203
11. Bit'ten Kubit'e 217
12. Bu Canlı! 243
13. Bir Kuantum Evreni 255

Teşekkür 269

Dizin 271

Gillian, Chelsea ve Rebecca'ya...

GİRİŞ

Okulda fen bilgisi öğretmeniniz belki de çoğu zaman size yalan söylemiştir. Size öğrettiği bilimsel bilgilerin, özellikle de fizikle ilgili bilgilerin büyük kısmı Victoria çağından, başka deyişle, 19. yüzyıldan kalmadır (pek çok insanın okulu sıkıcı bulmasının sebebi de muhtemelen budur). Fiziğin en önemli, en temel konuları olduğu iddia edilebilecek kuantum kuramı ile özel ve genel görelilik 20. yüzyılda geliştirilmiştir, ancak kısmen çok "zor" oldukları düşünüldüğünden, kısmen de öğretmenlerin çoğu bu konular hakkında pek fikir sahibi olmadığından okullarda genellikle görmezden gelinirler. Gündelik hayatımız üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, bu iki konudan biri muhtemelen şu anda insanın bilgi birikiminin en önemli kısmını oluşturduğundan, bu çok acınacak bir durumdur.

Görelilik büyüleyicidir ve gerçekten kafa karıştırıcıdır, ancak itiraf etmeliyim ki, oldukça faydalı bir şey olan kütleçekimi haricinde, göreliliğin günlük yaşantımızı etkileyen pek az uygulaması vardır. GPS uydularını hem özel hem de genel göreliliğe göre ayarlamak gerekir ancak göreliliğin işi burada biter; çünkü Einstein'ın çalışmalarından çok daha eski zamanlara dayanan "klasik" fizik, gözlemlediğiniz şeye, eğer ışık hızında seyahat etmiyorsanız, çok yakın bir tahmin sunar ve bir

arabanın hızlanmasından, Ay'a bir mekik göndermeye kadar her şey için yeterli derecede kullanışlıdır. Ancak kuantum fiziği tamamen farklıdır. Büyüleyici ve kafa karıştırıcı olsa da her şeyin temelinde yer alır. Gördüğümüz ve dokunduğumuz her şey kuantum parçacıklarından yapılmıştır. Nesneleri görmek için kullandığımız ışık da öyle. Siz de öylesiniz. Güneş ve tüm diğer yıldızlar da öyle. Güneş'i besleyen süreç olan nükleer füzyonun gerçekleşmesi kuantum fiziğine bağlıdır.

Bu, konuyu ilginçleştirir ve sizin de böylesine ilginç bir konuyu okulda gerçekten öğrenmiş olmanız gerekir. Ancak dahası da var, çünkü kuantum fiziği sadece fiziğin temellerini oluşturmakla kalmaz, gündelik hayatta cereyan eden olayların tamamında da yer alır. Gelişmiş ülkelerin, gayri safi yurtiçi hasılalarının yaklaşık yüzde 35'ini kuantum fiziğini aktif olarak kullanan teknolojilerden sağladıkları tahmin edilmektedir. Tabii eskiden işler böyle yürümüyordu. Bütün bunlar, biz henüz uygun bir isim veremediğimiz bir devrim yaşadıktan sonra oldu.

Bu, teknolojinin gelişimi sonucu insanın yaşam tarzında meydana gelen ilk büyük değişim değildir. Tarihçiler bir teknoloji "çağı" icat ederek genellikle bunun altını çizerler. Ne zaman yeni bir materyali işlemeyi başarıp daha kullanışlı, daha etkili aletler ve ürünler imal etsek, o materyalin adıyla anılan çağa giriyorduk: Taş Çağı, Bronz Çağı ve Demir Çağı. 19. yüzyılda uygulamalı termodinamik, güç üretebilme becerimizi artırıp bizi hayvanların gücü ve rüzgârlar ile dalgaların tahmin edilmez kuvvetine güvenmeyi bırakıp, buharın kontrol edilebilir kudretine bel bağlamaya itince, buhar çağına girdik. Bugün, henüz resmen kabul edilmemiş olsa da, kuantum çağını yaşıyoruz.

Bu çağın ne zaman başlamış olduğu tam olarak belirli değildir. Elektrik alanındaki öncüler bunun farkına varmamış

olsa da, elektriğin iletkenler boyunca akışı bir kuantum süreci olduğundan, mevcut elektriği kullanmaya başlamamızın gerçek kuantum teknolojisinin ilk kullanımı olduğunu iddia etmek mümkündür. Eğer bundan bir devrim olarak bahsetmek çok abartılı geliyorsa, o zaman kuantum etkilerini bilinçli olarak kullanan bir teknoloji olan elektroniğin hayatımıza girişi, yeni bir dünyaya girdiğimiz anlamına gelir. Artık lazerden MRI tarayıcıya kadar kuantum fiziği sayesinde çalıştırılan pek çok araca sahibiz. Cep telefonuyla konuşurken, televizyon izlerken, bir süpermarkette nakit para yerine kredi kartıyla alışveriş yaparken veya fotoğraf çekerken karmaşık kuantum etkilerinden faydalanıyoruz.

Kuantum fiziği olmasaydı madde olmazdı, ışık olmazdı, Güneş olmazdı ve en önemlisi iPhone olmazdı.

Kitapta şu ana kadar "kuantum" kelimesini başlığı ve kapağı saymazsak on üç defa kullandım bile. O yüzden bu "kuantum" kelimesinin ne anlama geldiğini anlamak ve arkasındaki tuhaf ve müthiş bilimi keşfetmek makul olacaktır.

BÖLÜM 1

KUANTUMA GİRİŞ

20. yüzyıla kadar maddenin ona hangi ölçekte bakarsanız bakın aynı kaldığı varsayılıyordu. Eski Yunan'da bir grup filozof, bir şey giderek küçülen parçalara bölünüp sonunda bölünemez bir şeye (*atomos*) ulaşıldığında, atomların gözlemliyor olduğumuz şeyin sadece daha küçük halleri olacağını tasavvur etmişlerdi. Örneğin peynir atomları, oluşturdukları peynir kalıbıyla sadece ölçekleri açısından farklı olacaklardı. Ancak kuantum kuramı bu düşünceyi tersine çevirdi. Işık fotonları ve elektronlar gibi çok küçük şeyler ve atomların, duyularımızla doğrudan tecrübe edebildiğimiz şeyler gibi davranmadıklarını fark ettik.

Paradigma değişimi

Kuantum seviyesinde çok farklı bir gerçeklik bulunduğunun fark edilmesine bilim tarihçileri tumturaklı bir isim verdiler: "paradigma değişimi". Bilim insanlarının dünyaya bakış açısı birden değişmişti. Kuantum devriminden önce atomların meydana getirdikleri maddelerle tamamen aynı özellikleri taşıyan küçük toplar olduğu varsayılıyordu. (Tabii atomlar gerçekten varsa... 20. yüzyıla dek birçok bilim insanı atomların

gerçekten var olduğuna inanmıyordu.) Kuantum fiziği atomların çok tuhaf davrandıklarını göstermişti. Mesela, grafit ve elmasın içinde sadece karbon atomları olmasına rağmen, bir karbon atomuna bir parça grafit veya elmastan çok farklı bir şeymiş gibi davranılması gerekiyordu. Kuantum parçacıklarının davranışı gerçekten de tuhaftır, ancak bu, insanın fizik doktorası yapmadan bunları kavrayamayacağı anlamına gelmez. Kuantum kuramının temellerini on yaşındaki çocuklara seve seve öğretiyorum. Kuramın matematiksel kısmını tabii ki anlatmıyorum; ancak, neler olup bittiğini anlamak için matematiğe ihtiyacınız yok. Şüphenizi bastırabilseniz yeter. Çünkü kuantum parçacıkları onlardan beklediğiniz şekilde davranmayı reddederler.

20. yüzyılda yaşamış ünlü kuantum fizikçisi (ileriki sayfalarda üzerinde ayrıntılı şekilde duracağımız) Richard Feynman bir konferansta şöyle konuşmuştu: "Size bunları sizin anlayabileceğiniz bir şekilde anlatacağımı mı düşünüyorsunuz? Hayır, bunları anlayamayacaksınız. O halde neden tüm bunlarla kafanızı şişireceğim? Eğer söyleyeceklerimi anlayamayacaksanız neden tüm bu süre zarfında burada oturup dinleyeceksiniz? Anlayamıyorsunuz diye konuyla ilgilenmekten vazgeçmemenizi sağlamak, sizi ikna etmek, benim görevimdir. Görüyorsunuz ki benim fizik öğrencilerim de anlamıyor. Çünkü *ben* de anlamıyorum. Kimse anlamıyor."

Öyle görünüyor ki Feynman daha başlamadan dinleyicilerine konuşmasını anlamayacaklarını söyleyerek onları susturmanın çok iyi bir yolunu bulmuştu. Ve büyük Feynman'ın anlamadığını söylediği şeyleri benim on yaşındakilere anlatabileceğimi öne sürmem çok komik olur, değil mi? Ancak Feynman, aslında ne demek istediğini açıklayarak devam etmişti. Mesele, dinleyicilerin neler olup bittiğini, kuantum fiziğinin neyi açıkladığını anlayamayacak olması değildi. Me-

sele, olayların neden o şekilde olup bittiğini kimsenin bilmiyor olmasıydı. Ve olayların o şekilde olup bitmesinin sebebi sağduyuya meydan okuyabilir ve bizim için bazı sorunlar yaratabilir. Aslında kuantum kuramını on yaşındaki çocuklara öğretmenin yetişkinlere öğretmekten daha kolay olduğu öne sürülebilir, bu da bence kuantum kuramının (ve göreliliğin) ilkokulda öğretilmesi gerektiğinin sebeplerinden biridir. Ancak bu farklı bir kitabın konusudur.

Feynman şöyle devam etmişti: "Size Doğa'nın ne olduğunu açıklayacağım; eğer açıklamam hoşunuza gitmezse, beni anlamanız zor olacaktır... Kuantum elektrodinamiği kuramı [ışık ve maddenin etkileşimiyle ilgilenen kuram] Doğa'yı, sağduyunun bakış açısına göre absürt olarak tanımlar. Bunu deneylerle de destekler. Yani Doğa'yı olduğu gibi (yani absürt olarak) kabul edeceğinizi umuyorum." Bu konuya alışılmadık bir hayranlık gösteren ve kuantum kuramını sevdiğini çünkü onu anlamadığını ifade eden romancı D. H. Lawrence'ın bakış açısını kabul etmeliyiz.

Yeni şeylerin şoku

Kuantum fiziğinin 20. yüzyılın başlarında şaşırtıcı ve sarsıcı bir değişime sebep olmasının sebebi, dürüst konuşmak gerekirse, kısmen bilim insanlarının doğayı çok iyi anlamış olduklarını zannetmeleriydi. Muhtemelen daha önce bu tavrı hiç takınmamışlardı ve zaten hiç takınmamaları da gerekirdi (fakat bu tavrın modern bilim insanlarında yaygınlaşmaya başladığını görebilirsiniz). Bilimsel kuruluşların kibri muhtemelen en iyi şekilde, zamanının önde gelen fizikçisi (Lord Kelvin diye tanıdığımız) William Thomson'un sözleriyle özetlenebilir. 1900'de, kendinden emin ve memnun bir edayla, "Fizikte keşfedilecek yeni bir şey kalmadı. Bundan sonra

gitgide daha hassas ölçümler yapmak dışında insanın elinden bir şey gelmez," demişti. Bunu söylediğinden en az 1943'te şu sözleri söyleyen IBM başkanı Thomas J. Watson kadar pişmanlık duymuş olmalıdır: "Bence dünya pazarı beş bilgisayar ile doyar."

Kelvin bu sözleri sarf ettikten birkaç ay sonra Max Planck adlı bir Alman fizikçi onun yanıldığını gösterdi. Planck "morötesi felaketi" gibi etkileyici bir ad verilmiş olan teknik bir sorunla uğraşıyordu. Nesnelerin ısıtıldıkları zaman ışık saçtıklarını hepimiz görmüşüzdür. Örneğin bir parça demiri alıp fırına koyarsanız, önce kırmızıya, sonra sarıya, beyaza ve sonunda maviye çalan bir renk alacaktır. Çağın fiziğinin tahmin etmiş olduğu "felaket", sıcak bir nesnenin yaydığı ışığın gücünün, o ışığın frekansının karesiyle orantılı olması gerektiğiydi. Bunun hem gerçek olmadığı hem de mümkün olmadığı açıktı.

Planck sorunu çözmek için hile yaptı. Işığın, bir dalgadan beklenenin aksine, istediğiniz miktarda *yayılamayacağını* hayal etti. Dalgalar herhangi bir büyüklükte veya dalga boyunda meydana gelebilir; bağımsız bileşenlere bölünebilmek yerine sonsuz değişkenlik sahibidirler. (Herkes ışığı dalga olarak bilir, çünkü okulda Victoria çağı bilimini öğrenir ve hâlâ çocuklarımıza dayatırız.)

Planck bunun yerine ışık sadece sabit büyüklükte topaklar halinde yayılıyor olsaydı ne olurdu diye düşündü. Böylece sorunu çözdü. Işığı topaklar halinde sınırlayıp matematiğe sokarsanız sızıntı etkisinden kurtuluyordunuz. Planck'ın ne demek istediği çok açıktı: Işığın gerçekten de topaklar (ya da kendi vermiş olduğu isimle, Latince'de aşağı yukarı "ne kadar" anlamına gelen *quantum*'un [kuantum] çoğulu *quanta* [kuantumlar]) halinde yayıldığını *düşünmüyordu*, ancak bu, matematiğin uygulanabilmesi için elverişli bir yöntemdi.

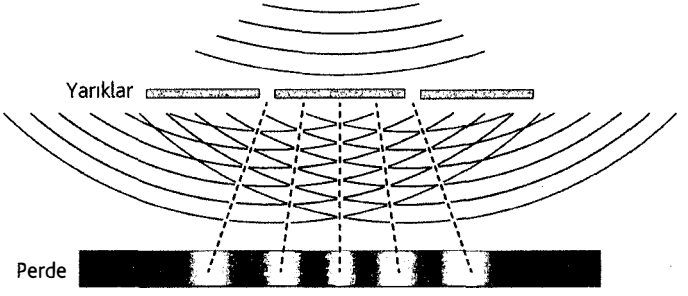
Bunun neden işe yaradığı hakkında hiçbir fikri yoktu, ışığın bir dalga olduğunu *biliyordu* çünkü bunu kanıtlayan pek çok deney vardı.

Bay Young'ın deneyi

Bu deneylerin belki de en meşhuru olan, hezarfen Thomas Young'ın (1773-1829) şaheseri, Young yarıkları deneyidir; bu konuya birkaç defa daha geri geleceğiz. Bu varlıklı hekim ve amatör bilim insanı, daha erken yaşlarda çok dikkat çekici biriydi. İki yaşında kendi kendine okumayı öğrenmişti. Ebeveynleri bunu Young Kutsal Kitap'taki bazı uzun kelimeleri okurken zorlanıp onlardan yardım istediğinde fark etmişlerdi. On üç yaşına geldiğinde Yunanca, Latince, İbranice, İtalyanca ve Fransızca'yı akıcı olarak okuyordu. Bu Young'un şöhrete ulaşacağının işaretiydi; Mısır hiyerogliflerinin ilk kısmi tercümesini yapmıştı. Ancak üstün yetenekleri lisan alanıyla sınırlı değildi; mühendislikteki elastiklik kavramını keşfetmek, sigorta şirketlerinin primlerini hesaplamalarına yardımcı olan mortalite tablolarını hazırlamak gibi yeniliklere imza attı.

Young'un ışığı anlamak konusundaki çığır açan keşfi, çiy damlalarının oluşumunda sıcaklığın etkisini araştırırken geldi. Doğada bu adamın ilgisini çekmeyen hiçbir şey yoktu. Mum ışığının, su buharını oluşturan su damlacıkları üzerindeki etkisini izlerken, ışık beyaz bir zemine düştüğünde bir dizi renkli halka meydana geldiğini keşfetti. Young bu etkinin ışık dalgaları arasındaki etkileşimden meydana geldiğinden şüphelendi; eğer bu doğruysa Christiaan Huygens'in Newton zamanlarında ortaya atmış olduğu dalga doğasını kanıtlamış oluyordu. 1801'de Young, ışığın her zaman bir dalga olduğunu kesinlikle gösteren bir deneyle bunu kanıtlamaya hazırdı.

Young karton üzerine bir yarık açıp keskin bir ışık demeti üretti; bu ışık ışınını başka bir karton üzerine açılmış iki paralel yarığın üzerine düşürdü ve son olarak da iki yarıktan geçen ışınların arkadaki bir perde üzerine düşmesini sağladı. Her iki yarığın perdede parlak birer çizgi üretmesi gerektiğini bekleyebilirsiniz ancak Young'un gözlemlediği şey, birbirini takip eden açık ve koyu bantlardı. Young için bu, ışığın bir dalga olduğuna dair yeterli kanıttı. İki yarıktan gelen dalgalar birbirleriyle etkileşime giriyorlardı. İki dalgadan da gelen dalgacıklar aynı yönde ilerliyorlarsa perdede buluştuklarında sonuç parlak bir bant oluyordu. Eğer dalgacıklar aksi yönde ilerliyorlarsa birbirlerini iptal ediyorlar ve karanlık bir bant oluşturuyorlardı. Benzer bir etki durgun suya, yakın aralıklarla iki taş atıldığında dalgacıkların etkileşiminde de gözlenebilir; bazı dalgalar birbirini destekler, bazıları iptal eder. Bu, dalgaların doğal davranışıdır.



Kesik çizgiler dalgaların kuvvetlenerek perdede parlak bantlar oluşturduğu yerleri gösteriyor.

Şekil 1. Young yarıkları

Bu gözlem Planck'ı, kuantumların hesaplamaların gözlemlenen şeyle uyuşmasını sağlayan geçici bir çözümden başka bir şey olmadığına ikna etmişti, çünkü ışık bir dalga olmak *zorundaydı*. Ancak yanılmış olduğu, kendisinden daha genç

ve gelenekleri daha az önemseyen bir adam tarafından kanıtlanmak üzereydi: Albert Einstein. Einstein Planck'ın fikrinin gerçekliğe, Planck'ın kabul edebileceğinden bile çok daha yakın olduğunu gösterecekti. Bakış açısındaki bu uyuşmazlık, Planck Einstein'ı 1913'te Prusya Bilimler Akademisi için önerdiğinde iyice su yüzüne çıkacaktı. Planck akademiden Einstein'ın ara sıra "ışık kuantumları kuramında olduğu gibi spekülasyonlarında bazen hedefi şaşırdığı" gerçeğini dikkate almamasını rica ediyordu.

Einstein dokunuşu

Einstein bu "spekülasyonu", henüz 26 yaşında genç bir adamken yapmıştı (hepimizin tanıdığı ak saçlı ikonu unutun; o zamanlar atak ve çapkın bir gençti). 1905 yılında Einstein henüz doktorasını almamıştı ve teknik olarak bir amatördü, ama özel görelilik kavramını ortaya atmış,* Brown hareketinin nasıl açıklanabileceğini göstermiş,** atomların gerçekten var olduğunu açıklamış ve Planck'ın kullanışlı hesaplama yöntemini bir gerçeklik modeline dönüştüren fotoelektrik etkisi (*bkz.* sayfa 13) için bir açıklama geliştirmişti. O sene çok önemli şeyler yapmıştı.

Einstein beklentilere uymaya kafa yoracak biri değildi. Çocukken katı Alman eğitim sistemiyle başa çıkmakta zorlan-

* Einstein'ın Galileo'nun görelilik kuramını açıklaması. Galileo tüm hareketlerin bir şeye göre ölçülmesi gerektiğini gözlemlemiş, ancak Einstein ışığın her zaman aynı hızla hareket ettiğini eklemişti. Bu özel görelilik zaman ve mekânın birbirine bağlı ve gözlemcinin hareketine bağımlı olduğunu göstermektedir.

** İskoç botanikçi Robert Brown'un (1773-1858) su içinde süspansiyon haline getirilmiş olan polen taneciklerinin etrafta dans ederek dolaştığı gözlemi. Einstein bunun hızlı hareket eden su moleküllerinin taneciklerle çarpışmasıyla nasıl meydana gelebileceğini göstermişti.

mış, tembel ve işbirliği yapmayan bir öğrenci olarak ünlenmişti. Öğrencilerin çoğunun sınavları geçmek ve karşı cinsle ilişki kurmaktan başka bir şey düşünmediği on altı yaşına geldiğinde artık bir Alman vatandaşı olamayacağına karar vermişti. (Genç Albert, kızlarla konuşmakta zorlanan klasik inek öğrenci olduğundan değil, tam tersi.) İsviçre vatandaşlığına geçmeyi umarak Zürih'teki Federal Teknoloji Enstitüsü'ne ve İsviçre Konfederasyonu Teknik Yüksekokulu'na (İKTY) başvurdu. Bilim alanındaki becerilerinden emin olan Einstein kabul sınavına girdi, ama başarısız oldu.

Sorunu genç ve belli alanlara odaklanmış olmasıydı. Einstein bilim harici konularda çok zaman harcamayı anlamsız buluyordu, ancak İKTY sınavları çok yönlü kişileri seçmek için tasarlanmıştı. Fakat okul müdürü genç Albert'tan çok etkilenmişti; ona bir İsviçre lisesinde bir yıl geçirerek daha uygun bir eğitim almasını önerdi. Einstein sonraki yıl sınava tekrar girdi ve bu sefer geçti. İKTY Einstein'a rüyalarını gerçekleştirmesi için sıkı Alman okullarından kesinlikle daha fazla esneklik göstermişti, ancak dik kafalı yaklaşımı fizik bölümü başkanı olan Heinrich Weber'in, öğrencisine şunları söylemesine sebep olmuştu: "Çok akıllı bir çocuksun ancak büyük bir kusurun var: Hiç laf dinlemiyorsun."

Einstein mezun olduktan sonra ünlü bilim insanlarına yazıp kendisini yanlarına asistan olarak almalarını isteyerek bir yer bulmaya çalıştı. Bu alışılmadık strateji başarısız olunca, Alman vatandaşlığını reddetmiş olduğundan ve bu sebeple teknik olarak vatansız olduğundan, İsviçre vatandaşlığına geçebilmek için bir öğretmenlik işi buldu. Ancak Einstein kısa süre sonra, kendisine düşünebilmesi için çok boş zaman verecek başka bir işe geçti; Bern'deki İsviçre Patent Ofisi'ne Üçüncü Sınıf Patent Memuru olarak girdi.

Işıktan elektriğe

Burada çalışırken 1905'te Planck'ın işe yarayan hilesini kuantum kuramının gerçek temeline dönüştürerek ona Nobel Ödülü'nü kazandıracak olan makaleyi yazdı. Konu fotoelektrik etkisiydi, yani güneş ışığından elektrik üreten, artık her yerde gördüğümüz güneş pillerinin bilimi. 1900'lerin başlarında bilim insanları ve mühendisler bu etkinin farkındaydılar ancak o zamanlar modern fotoelektrik pillerini mümkün kılan yarıiletkenler yerine daha çok metaller üzerinde çalışılıyordu. Bunlarda fotoelektrik etkinin oluşması şaşırtıcı değildi. Işığın bir elektrik bileşeninin olduğu biliniyordu ve bunun için de bir metal parçasındaki elektronları* harekete geçirerek küçük bir akım üretebileceği makul gözüküyordu. Ancak bunun meydana geliş biçiminde bir tuhaflık vardı.

Bundan birkaç yıl önce Macar Philipp Lenard bu etki üzerinde kapsamlı deneyler yapmış ve metal üzerine yansıtılan ışığın ne kadar parlak olduğunun bir önemi olmadığını bulmuştu; belirli bir renge sahip ışıkla metalden serbest kalan elektronlar her zaman aynı enerjiye sahiptiler. Eğer ışık spektrumunda aşağı inerseniz, ışık ne kadar parlak olursa olsun hiçbir elektronun akmadığı bir renge ulaşırsınız. Ancak eğer ışık bir dalgaysa bu hiçbir anlam ifade etmez. Bu denizin ancak dalgalar çok sık geldiğinde bir şeyi alıp götürebilmesi ve sıklığı çok düşük olan geniş, devasa dalgaların tek bir kum tanesini bile hareket ettirememesi gibidir.

Einstein, Planck'ın hayali ışık topakları olan kuantumların bir açıklama sağlayacağını keşfetmişti. Eğer ışık, bir dalga olmak yerine bir dizi parçacıktan meydana geliyorsa, gözlenen etkileri gösterecekti. Tek bir ışık parçacığı (1920'lerde Ameri-

* Elektronlar atomların dış bölgelerinde yer alan negatif yüklü temel parçacıklar olup elektrik akımını iletirler.

kalı kimyacı Gilbert Lewis buna "foton" adını verdi) ancak yeterli enerji sahibi olduğunda bir elektronu hareket ettirebilirdi ve ışık göz önüne alındığında yüksek enerji, spektrumda daha ilerde olmak demekti. Ancak etki tek bir foton ile tek bir elektron arasındaki etkileşimden kaynaklandığı için sonucun mevcut olan fotonların sayısıyla (ışığın parlaklığıyla) ilgisi yoktu.

Einstein Planck'ın işe yarayan matematik hilesini bir gerçeklik tanımına çevirmekle ve fotoelektrik etkiyi açıklamakla kalmayıp, meslek hayatının büyük kısmını adayacağı kuantum fiziğinin temellerini atmıştı. On yıla kalmadan Einstein'ın "gerçek" kuantum kavramı, atomla ilgili ciddi bir sorunu açıklayabilmek için genç Danimarkalı fizikçi Niels Bohr tarafından ödünç alınacaktı. Çünkü atomlar aslında kararlı olmamalıydılar.

Kesilemez madde

Görmüş olduğumuz üzere atom fikrinin geçmişi Antik Yunan'a kadar uzanır. Elementlerin doğası için bir açıklama olarak Britanyalı kimyacı John Dalton (1766-1844) tarafından kullanılmıştır ancak atom kavramı 20. yüzyıl başlarında (Einstein'ın 1905'te yazdığı, Brown hareketini ele alan makalesi sayesinde) metaforik bir kavram olmaktan çıkıp gerçek bir şey olarak ele alınmaya başlanmıştı. Fikir ilk ortaya atıldığında, atom maddenin en küçük, bölünemez parçası olarak düşünülmüştü (Yunanca *atomos* sözcüğü "kesilmez" anlamına gelir) ancak Britanyalı fizikçi Joseph John Thomson (genellikle J. J. olarak bilinir) 1897'de atomların, hangi atom olursa olsun elektron adını verdiği daha küçük parçacıklar üretebileceğini keşfetmişti. Daha sonra elektronun atomun bileşenlerinden biri olduğu sonucuna vardı; velhasıl, atomlar kesilebiliyordu.

Atomların elektrik yükü yokken elektron negatif yüklüdür, yani orada bir yerlerde onu dengeleyecek pozitif yüklü bir şeyler olmalıdır. Thomson "erik pudingi atom modeli" olarak ünlenecek modeli hayal etti. Bu modelde bir dizi elektron (pudingdeki erikler) pozitif yüklü jölemsi bir ortam içerisinde dağınık halde bulunuyordu. Thomson başlangıçta atomu meydana getiren tüm kütlenin elektronlardan ileri geldiğini düşünüyordu (bu, en hafif atom olan hidrojenin bile en az bin elektron içermesi gerektiği anlamına geliyordu) ancak sonraki araştırmalar atomun pozitif kısmında da kütle olduğunu ve örneğin hidrojenin, bugün bildiğimiz gibi, tek bir elektronu olduğunu öne sürmekteydi.

Bohr'un keşif yolculuğu

25 yaşındaki fizikçi Niels Bohr, memleketi Danimarka'dan uzakta atomları araştırmak için bir yıllık bir burs kazandığında nereye gitmek istediği hakkında hiç şüphesi yoktu: Büyük Thomson'ın yanına gidecekti. Böylece 1911'de, sınırlı İngilizcesini geliştirmek için Dickens'ın *The Pickwick Papers* adlı kitabı ve bir sözlük ile silahlanmış olarak Cambridge'e geldi. Ne yazık ki Thomson'a ilk toplantılarında, büyük adamın kitaplarındaki hesaplamalardan birinin yanlış olduğunu söyleyerek kötü bir başlangıç yaptı. Bohr hayal etmiş olduğu gibi Thomson ile işbirliği yapmak yerine Cambridge fizik bölümünün yıldızını pek nadir görüyor ve zamanının büyük kısmını en az sevdiği etkinlikle uğraşarak, deney yaparak geçiriyordu.

Ancak 1911'in sonlarına doğru iki rastlaşma Bohr'un geleceğini değiştirdi ve kuantum kuramının gelişimi için yolu açtı. İlk olarak Manchester'daki bir aile dostunu ziyareti esnasında ve daha sonra Cambridge'de bir akşam yemeğinde o

zamanlar Manchester Üniversitesi'nde çalışan heybetli Yeni Zelandalı fizikçi Ernest Rutherford ile karşılaştı. Rutherford kısa süre önce atomun kütlesinin büyük kısmının, kalbindeki küçücük çekirdekte bulunan pozitif yüklü topakta yoğunlaştığını göstererek erik pudingi modelini geçersiz kılmıştı. Bohr, Thomson yerine Rutherford ile birlikte çalışmasının çok daha iyi olacağını düşünerek kısa süre sonra Manchester'a doğru yola çıktı.

Bohr burada kuantum atomunun temelini oluşturacak olan ilk fikirlerini üretmeye başladı. Atomun (göreli olarak) devasa bir çekirdek ve onun çevresinde dönen küçük elektronlardan oluştuğunu varsaymak doğal gözüküyordu. Güneş sistemini andıran bu atom modelinde gezegenleri yörüngelerinde tutan kütleçekimi kuvvetinin yerini pozitif yüklü çekirdek ile negatif yüklü elektronlar arasında oluşan elektromanyetik çekim kuvveti alıyordu. Ancak bu model, atomu betimlemek için sık sık kullanılmasına (ve atomu betimlemek isteyenlerin bu modeli kullanmasını önlemek neredeyse imkânsız olmasına) rağmen temel bir sorunu beraberinde getirir. Eğer bir elektron çekirdeğin etrafında yörüngede dönüyorsa enerji fışkırtacak ve çekirdeğe düşecektir, çünkü hızlanan bir elektrik yükü enerji saçar. Elektron çekirdeğe düşmeyip yörüngede kalmak için hızlanmak zorundadır. Ancak elektronları sabit konumlarda hayal etmek de bundan daha iyi değildir. Elektronların hareket etmediği kararlı bir düzenleme mevcut değildir. Bu, Bohr için çok büyük bir problem yaratıyordu.

Isıtılan atomların enerji taşıyan ışık fotonları saçtığını gösteren deneylerden ilham alan Bohr, radikal bir çözüm önerdi. Evet, elektronlar yörüngede olabilirdi, ancak sadece bu yörüngeler bir uydunun değişebilen yörüngesinin aksine demiryolu rayları gibi sabitlerse. Ve bir raydan diğerine geçmek,

bir foton soğurmaya veya saçmaya denk gelen sabit miktarda enerji gerektiriyordu. Böylelikle sadece ışığın değil, atomun yapısına da kuantum kuramı uygulanmış oldu. Bir elektron seviyeler arasında sürüklenemezdi, sadece belirli bir yörüngeden bir diğerine sıçrayabilirdi.

Atomun içi

Atom şaşırtıcı bir şeydir, öyle ki nasıl göründüğü hakkında durup düşünmeye değer. Çok hatalı olmasına rağmen geleneksel güneş sistemi resmi hâlâ kullanışlı bir başlama noktasıdır. Başlangıç olarak aynen bir güneş sistemi gibi atom merkezde devasa bir kütleye ve dışarıda çok daha düşük bir kütleye sahiptir. En basit atom olan hidrojene bakarsak çekirdek olarak pozitif yüklü tek bir parçacığa (bir proton) ve etrafında negatif yüklü tek bir elektrona sahiptir. Proton, yani çekirdek, aynen Güneş'in Dünya'dan çok çok daha büyük olması gibi elektrondan neredeyse 2.000 kat daha büyüktür. Ve bir güneş sistemi gibi bir atom da çoğunlukla boşluktan meydana gelmiştir.

Bir atomdaki boşluğun miktarının en eski ve en etkili örneklerinden birisi, bir atomun çekirdeğinin bir sinek büyüklüğünde olduğunu hayal ettiğinizde tüm atomun bir katedral büyüklüğünde olacağıdır ve elektronların belli belirsiz varlığı haricinde çekirdeğin dışı tamamen boştur. Ancak şimdi güneş sistemi modelinden uzaklaşmamız gerekiyor. Gerçek bir güneş sistemi modelinin kendi içine çökeceğini zaten söylemiştim. Başka bir farklılık da, güneş sisteminin aksine elektronlar ve çekirdeğin yer çekimiyle değil de elektromanyetizmayla bir arada durduğudur. Ve burada karşımıza, onu açıklayabilecek herhangi birine Nobel Ödülü kazandıracak gerçek bir tuhaflık çıkıyor. Elektron, çekirdekteki protonun

pozitif yüküyle tam olarak aynı büyüklükte (karşıt kutupta) yüke sahiptir. Bunun neden böyle olduğuna dair kimsenin bir fikri yok, ancak atomların iş görebilmesinde çok faydalı olduğu açık. Güneş sisteminde buna eşdeğer bir şey yoktur. Kütleçekimi tek kuvvettir.

Güneş sistemi modelini bir kenara bırakmamızı gerektiren son sebep, elektronların çekirdeklerin etrafında gezegenlerin Güneş'in etrafında dolandığı gibi güzel, iyi tanımlanmış yörüngelerde dolanmıyor olmalarıdır. Yaptıkları hareketlerin Bohr'un ilk olarak öne sürmüş olduğu tren raylarındaki hareketle uzaktan yakından ilgisi yoktur. Kuantum parçacıkları, asla böyle bir şey yapacak kadar düşünceli ve tahmin edilebilir olmazlar; bunu yakında göreceğiz. Elektronları daha iyi resmetmek isteyen biri, grafik tasarımcıların sevdiği, yörünge çizgileri üzerinde düzgün biçimde hareket eden parçacıklar yerine atomun etrafında bulanık bir olasılık bulutu çizmelidir (hem bunu çizmek çok daha kolaydır).

Bohr'un kaldığı yerden devam

Bohr'un atomların yapısı hakkındaki fikrinin fizik anlayışımızı tek başına değiştirdiğini söylemek abartı olur; her şey bir yana, onun orijinal modeli sadece en basit atom olan hidrojen için geçerliydi. Ancak kısa süre sonra (de Broglie, Heisenberg, Schrödinger ve Dirac önderliğinde) bir grup genç fizikçi bayrağı devraldı ve kuantum kuramını atomlar ve fotonlar gibi diğer kuantum parçacıklarının nasıl davrandığının etkili bir tanımını yapmak için inşa etmeye başladılar. Verdikleri mesaj, parçacıkların çok kötü davrandıklarıydı; en azından bu davranışlar her gün karşımıza çıkan olağan nesnelerden beklediğimiz davranışlarla karşılaştırıldığında durum böyle görünüyordu.

Louis de Broglie, ışığın hareketini açıklamaya çalışırken Einstein'ın yaptığı gibi dalgalar yerine parçacıkları getirmenin yanı sıra parçacıklar yerine dalgaları getirmenin de doğru olacağını gösterdi; atomlar ve elektronlar gibi genellikle parçacık olarak düşündüğümüz kuantum nesneleri, sanki dalgaymışçasına hareket etmeyi çok seviyorlardı. Young'un iki yarık deneyinin bir türevi parçacıklarla, parazit motifleri çıkartarak tekrarlanabilirdi. Bu esnada Werner Heisenberg, Bohr'un gözlemlenen "gerçek" dünyayı temel alarak modellediği yörüngelerden rahatsızdı ve kuantum parçacıklarının tahmin edilebilirliği üzerine bir açıklama bulmaya çalışma fikrini tamamen terk etmişti. Matris mekanikleri adında, kuantum parçacıklarının davranışını tahmin etmek için tamamen matematiksel bir yöntem geliştirmişti. Matrisler (iki boyutlu sayı dizileri) doğrudan gözlemlenen herhangi bir şeyi temsil etmiyorlardı; doğru şekilde manipüle edildiklerinde sadece doğada görülen sonuçların aynılarını üreten değerlerdi.

Bir şeylerin zihinde canlandırılması konusunda Heisenberg'den her zaman daha rahat olan Erwin Schrödinger, başlangıçta de Broglie'nin dalgalarının davranışını açıklaması umulan dalga mekaniği olarak bilinen alternatif bir formülasyonla çıkageldi. Nihayetinde Schrödinger ve Heisenberg'in yaklaşımlarının tamamen eşdeğer olduğunu Paul Dirac gösterecekti. Ancak Schrödinger eğer kuantum vahşiliğini evcilleştirdiğini düşünmüşse yanılıyordu. Eğer dalga denklemi parçacıkların davranışını gerçekten tanımlamış olsaydı, kuantum parçacıklarının kademeli olarak zamana yayılıp uçsuz bucaksız hale gelmesi gerekirdi. Bu absürttü. Daha da kötüsü dalga denklemlerinin çözümleri hayali sayılar içeriyordu, ki bu da genellikle hesaplamalarda bir şeylerin yanlış gittiğine işaretti.

Gerçek olamayacak sayılar

Sanal sayı kavramı 16. yüzyıldan beri biliniyordu. Karekök fikrine dayanıyordu. Muhtemelen okuldan hatırlayacağınız üzere bir sayının karekökü, kendisiyle çarpıldığı zaman karekökü alınan sayıyı veren değerdir. Yani mesela 4'ün karekökü 2'dir. Veya 2, 4'ün kareköklerinden biridir çünkü –2 de kendisiyle çarpıldığında 4'ü verir. 4 sayısının 2 ve –2 olmak üzere iki karekökü vardır. Ancak bu karekök alanında bir boşluk bırakmaktadır. Mesela –4'ün karekökü nedir? 2 de olamaz –2 de çünkü bu iki sayının da kendisiyle çarpımı 4 verir. Öyleyse negatif bir sayının karekökü ne olabilir? Bununla başa çıkabilmek için matematikçiler –1'in karekökü olarak "i" adı verilen keyfi bir değer belirlemişlerdir. i'yi bir kere tanımladıktan sonra –4'ün kareköklerinin 2i ve –2i olduğunu söyleyebiliriz. i'ye dayalı olan bu sayılar sanal sayılardır.

Bu, matematikçilerin boş zamanlarında kendilerini eğlemek için yapabileceği bir şey gibi gözüküyor; oldukça eğlenceli ancak gerçek dünyayla ilgisi yok. Ancak hem reel, hem de sanal bir bileşeni olan 3+2i gibi karmaşık sayıların aslında fizikte ve mühendislikte çok kullanışlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi, reel sayıların x ekseninde ve sanal sayıların y ekseninde bulunduğu bir grafik üzerinde, bir karmaşık sayının bir nokta olarak temsil edilmesiyle bir karmaşık sayının iki boyutu olan bir noktayı temsil eden tek bir değer sağlamasıdır. Sanal kısımlar, bir gerçek dünya tahmini olarak ortaya çıkmadan önce birbirlerini sadeleştirip yok olduğu sürece karmaşık sayıların harika bir araç olduğu ortadaydı. Ancak Schrödinger'in dalga denkleminde sanal sayılar kibarca ortamı terk etmeyip ortada kaldı ve konuyla ilgilenen herkesi utandırdı.

Karenin olasılığı

Bu karmaşa Einstein'ın yakın arkadaşı Max Born tarafından çözüldü. Born, Schrödinger'in denkleminin elektron veya foton gibi bir parçacığın aslında nasıl davrandığını söylemediği sonucuna vardı. Bir parçacığın yerini göstermek yerine parçacığın belirli bir konumda bulunma *olasılığını* gösteriyordu. Daha kesin konuşmak gerekirse denklemin karesi, bu sakıncalı hayali sayılardan kurtularak olasılığı gösteriyordu. Parçacığın kendisinin zamana yayılması tasavvur edilemez olsa da bu şekilde bir yerde bulunmasının *olasılığı* tamamen akla yatkındı. Ancak Born'un bulduğu çözüm için ödenen bedel olan bu olasılık, gerçeklik tanımımızın önemli bir parçası haline geldi. Kanıtsız kabul edilmesi gerekse de (örneğin kimse neden sonucun karesinin alınması gerektiğini söyleyemiyor) Born'un denklem hakkındaki açıklaması çok doğruydu ve uygulamada hiç sorun çıkarmadan iş gördü.

Belirsizliği bir dereceye kadar açıklamak için olasılığı kullanmak yeni bir fikir değildir. Bir köpeği bir parkın ortasına bırakıp gözlerimi on saniyeliğine kapatarak bunu gösterebilirim. Gözlerimi açtığımda köpeğin tam olarak nerede olacağını önceden söyleyemem. Ancak onu bırakmış olduğum yerden en fazla 20 metre uzaklaşmış olabileceğini ve elektrik direğinin yakınlarında olması olasılığının, kayın ağacının yakınlarında veya atlıkarıncaya binmiş olması olasılığından yüksek olacağını söyleyebilirim. Ancak olasılığın günlük hayatta bu şekilde kullanılması gerçekliği yansıtmaz, bilgimdeki belirsizliği yansıtır. Köpek aslında her zaman yüzde 100 kesinlikle belirli bir konumda bulunacaktır; sadece gözlerimi açana kadar nerede olacağını bilemem.

Eğer bir köpek yerine bir kuantum parçacığını gözlemliyorsam Schrödinger'in Born tarafından açıklanmış olan denklemi, bana parçacığı farklı olası konumlarda bulma ola-

sılığını da verir. Ancak buradaki fark, farkında olmadığım bir gerçekliğin ben bakana kadar mevcut olmamasıdır. Ölçüm yapana ve parçacık için bir konum üretene kadar var olan tek şey olasılıktır. Parçacık, onu bulduğum yerde ölçüm yapılan ana kadar "gerçekten" mevcut değildir.

Bu bakış açısını benimsemek hayal gücünü epey zorlamayı gerektirir (on yaşındaki çocukların kuantum kuramıyla başa çıkmakta yetişkinlerden daha başarılı olmasının sebebi muhtemelen budur), ancak sağduyunuzun sizi düzeltmek için harcadığı çabaların üstesinden gelebilirseniz, mesela, Young'un yarık deneyinde ışık fotonlarının nasıl iş görüyor olabileceğini düşünürken karşılaşabileceğiniz sorunları bertaraf edebilirsiniz. Hatırlarsanız geleneksel dalga resmi, iki yarıktan da geçen ve perdede şerit motiflerini yaratmak için birbirleriyle etkileşime giren dalgalar içeriyordu. Ancak bu, fotonlarla (veya elektronlarla) nasıl olacaktır? Bu parçacıkların üretimini artık yarıklara her defasında bir tane gönderilecek kadar hassas şekilde ayarlayabildiğimiz göz önüne alındığında bu zorluk iyice artar ve yine de zamanla olasılık dalgalarının etkileşiminden kaynaklanan parazit motifi perdede birikir.

Nerede bu parçacık?

Neredeyse tüm bilim insanlarının kapıldığı çok tehlikeli bir cazibe mevcuttur. Geçmişte benim de bu cazibeye sık sık kapılmış olduğumu itiraf etmeliyim. TV bilimcisi Brian Cox'un da *The Infinite Monkey Cage* (Sonsuz Maymun Kafesi) adlı radyo programında bir fotonun aynı anda iki yerde birden bulunduğunu söyleyerek bu hatayı yaptığını duydum. Hatta Cox'un (Jeff Forshaw ile birlikte yazmış olduğu) *The Quantum Universe* (Kuantum Evreni) adlı kitabında "Aynı Anda

İki Yerde Olmak" başlıklı bir bölüm bile mevcuttur. Kuantum kuramının bir fotonun aynı anda iki yerde birden bulunabileceğini, böylelikle iki yarıktan birden geçerek kendisiyle etkileşime gireceğini öne sürdüğünü dile getirmek çekici ancak hatalı bir tanımdır. Ancak bu tanım, kuantumun olasılıklar dünyasında aslında neler olup bittiğini hatalı bir şekilde betimler.

Şunu söylemek daha uygundur: Young yarıkları deneyindeki bir foton perdeye vurup fark edilene kadar *hiçbir yerde* değildir. O ana kadar mevcut olan tek şey, dalga denklemi ile (denklemin karesiyle) tanımlanmış olan bir dizi konum olasılığıdır. Bu olasılık dalgaları iki yarığı da kapsadıklarından perdede görünen nihai sonuç, bu olasılık dalgalarının etkileşime girmesidir ancak dalgalar fotonun kendisi değildir. Eğer deneyi yürüten kişi yarıkların birine fotonun geçmesine izin veren ancak geçişi tespit edebilen bir detektör koyarsa etkileşim motifi yok olur. Fotonu bir konuma doğru zorlamış oluruz ve olasılık dalgalarının etkileşime girmesi fırsatı ortadan kalkar.

Olasılığın bu temel rolü Einstein'ı o kadar rahatsız etmişti ki Max Born'a pek çok defa yazdığı mektuplarda, Tanrı zar atmıyor olduğundan bu fikrin doğru olamayacağını söylemişti. Einstein olasılığa bağlı kuantum etkilerinden birini tanımlarken, "O halde bir fizikçi değil, bir ayakkabı tamircisi hatta bir kumarhane çalışanı olmayı tercih ederim," demişti.

Heisenberg ünlü Belirsizlik İlkesi'ni olasılığın bu merkezi rolünden türetmişti. Kuantum parçacıklarının mekân ile momentum veya enerji ile zaman gibi muhtemelen yakından ilişkili özellik çiftlerine sahip olduklarını göstermişti. Bu değer çiftlerini oluşturan öğelerden birini ne denli isabetli şekilde tahmin ederseniz diğerine ilişkin tahmininiz o denli isabetsiz olur. Örneğin eğer bir parçacığın momentumunu (kütle çarpı

hız) kesin olarak biliyorsanız bu parçacık evrende herhangi bir yerde mevcut olabilir.

Lanet kedi

Muhtemelen burada Schrödinger'in kedisinden bahsetmemiz gerekiyor; kuantum kuramı hakkında bize büyük bir öngörü verdiğinden değil, ancak konu kuantum fiziği olduğunda bu kediden o kadar sık bahsedilir ki bir bağlama oturtulması gerekir. Schrödinger bu düşünce deneyini, her gün gözlemlediğimiz "makro" dünyaya uygulanması halinde kuantum kuramının olasılıkçı niteliğinin insanda ne tuhaf hisler doğuracağını göstermek için tasarlamıştı.

Young yarıkları deneyindeki tek fotonlar dahi, yukarda bahsi geçen parazit motiflerini üretiyordu ama bir fotonun hangi yarıktan geçmiş olduğunu kontrol ettiğinizde olasılıklar gerçek bir değer haline geliyor ve motif ortadan kalkıyordu. Kuantum parçacıkları, gözlemlenene kadar tipik olarak süperpozisyon halini alırlar. (Süperpozisyon hali, bir parçacığın eşsiz, gerçek bir halde bulunmaktansa eşzamanlı olarak bir hal aralığında bulunabilmesidir.) Kedi deneyinde radyoaktif bir maddenin bir kuantum parçacığı, parçacık bozunduğunda ölümcül bir gazın salınımını tetikleyecek şekilde kullanılmıştır. Gaz daha sonra bir kutudaki kediyi öldürür. Radyoaktif parçacık bir kuantum parçacığı olduğundan gözlemlenene kadar süperpozisyon halinde, bozunmuş veya bozunmamış olma olasılığının bileşimi olarak mevcuttur. Bu da kediyi tahminen canlı ve ölü durumların süperpozisyonu halinde bırakır. Bu da oldukça tuhaftır.

Aslında süperpozisyonda kaldığı sürece kedinin korkmasına gerek yoktur; elbette ki hâlâ ölebilir. Deney tanımlanmış olduğu gibi parçacığın, yani bu durumda kedinin, kutu açıla-

na kadar süperpozisyonda kalacağını varsaymaktadır. Ancak Young yarıkları deneyinde bir detektörün sadece mevcudiyeti bile bu durumu ortadan kaldırmak ve parçacığın geçtiği yarığı gösterecek bir gerçek değer belirlemek için yeterlidir. Yani gazın tetiklendiği kedi deneyine yerleştirilecek bir detektörün de durumları ortadan kaldırmayacağını varsaymak için bir sebep yoktur. Ancak Schrödinger'in kedisi bilim yazarları arasında o kadar meşhurdur ki (keşke sadece ressamlara çizecek ilginç bir şeyler vermesinden ötürü olsaydı) öneminin vurgulanması gereklidir.

Kedi çok ünlü olduğundan diğer kuantum deneylerinde de ortaya çıkma eğilimindedir. Schrödinger'in kedisi deneyinin orijinali, sadece çok küçük şeyleri içine alan kuantum dünyası ile çevremizde gözlemlediğimiz klasik dünya arasındaki bulanık sınırlar hakkındadır. Deneyleri tasarlayanlar gitgide daha büyük nesneler için süperpozisyona ve diğer kuantum etkilerine ulaşmak için sürekli olarak bu sınırı esnetmenin peşindedirler. Kısa süre öncesine kadar bu kapsamda "daha büyük" demenin ne anlama geldiğini kesin olarak ifade etmek mümkün değildi; bir nesnenin makroskopik veya mikroskopik olup olmadığının (ve kuantum etkilerine açık olup olmadığının) nasıl ölçüleceği bilinmiyordu. Ancak 2013'te Duisburg-Essen Üniversitesi'nden Stefan Nimmrichter ve Klaus Homberger, Schrödinger'in denklemindeki kuantum halini yok etmek için gereken minimum modifikasyonu tanımlayan bir matematik ölçümü geliştirdiler ve bir süperpozisyona onun ne kadar gerçekçi olduğunu anlatan sayısal bir değer verdiler.

Bu ölçüm, verilmiş olan herhangi bir süperpozisyon ile tek bir elektronun süperpozisyonda kalma becerisini karşılaştıran bir değer üretir. Örneğin günümüzde, süperpozisyonda kalabilmiş en büyük molekül 356 atoma sahiptir. Kuramcılar

bunun 12'lik bir "makroskopiklik" faktörüne sahip olacağını, bu şekilde de 10^{12} saniye boyunca süperpozisyonda kalan bir elektronla karşılaştırıldığında bir saniye boyunca süperpozisyonda kalacağını hesaplamışlardır. Makroskopiklik faktörü 23'e kadar olan nesnelerin süperpozisyon halinde bulunması makul bir beklentidir. Bunu bir bağlama oturtmak ve ayrıca Schrödinger'i de onurlandırmak için kuramcılar bir kedinin makroskopikliğini de hesaplamıştır.

Fizikçiler, her zaman yaptıkları basitleştirmelerden birini yapıp işe kedinin 4 kilogramlık bir su küresi olduğunu varsayarak başlamışlardır ve kedi birbirine 10 santimetre uzaklıkta iki konumda bir saniye boyunca süperpozisyonda kalmayı başarmıştır. Hesaplama sonucu 57 civarında bir faktör olarak bulunmuştur; bir elektronu 10^{57} saniye boyunca süperpozisyona koymanın eşdeğeri olup evrenin yaşının yaklaşık 1039 katıdır ancak 10^{23} beklentisinin dahi evrenin yaşam süresinden uzun olduğunu belirtmek gerekir. Ender de olsa, alışılmadık şeyler meydana gelmektedir ve kuantum araştırmacıları asla "asla" dememek için her zaman dikkat gösterirler.

Bu alanı sezgilere aykırı ve büyüleyici kılan, kuantum kuramının bu tuhaf yönleridir. Ve kuantum etkileri, çevremizdeki doğal dünyadan başka hiçbir yerde bu kadar sık belirmez. Kuantum kuramı sadece laboratuvarla veya ileri teknoloji mühendisliğiyle ilgili bir şey değildir. Yaşamı destekleyen Güneş'in hareketlerinden tutun biyolojinin hemen göze çarpmayan yönlerine dek, çevremizdeki dünyayı doğrudan etkiler.

BÖLÜM 2

KUANTUM DOĞASI

Bilimi öğrenme şeklimizden ötürü bilimsel alanları birbirlerinden kesin sınırlarla ayırmak bize çekici gelir. Örneğin fizik nesnelerin nasıl davrandığını incelerken biyoloji doğanın canlı kısmıyla ilgilenir. (Fizik geçmişi olan birisi olarak, biraz acımasızca davranıp, kimyanın, bu iki bilim dalının da ilgilenmek istemediği alanlarda temizlik işi yaptığını iddia edebilirim.) Ancak bu etiketler ve ayrımlar keyfidir ve insanların belirlemiş olduğu şeylerdir. Kuantum kuramının, üzerinde fizik yazan kutunun içerisinde kalma niyeti yoktur. Doğa kuantum süreçlerini kullanır.

Her yer kuantum

Bu, doğa hakkında herkesin bildiği bir şeydir. Atomların ve ışığın kuantum kuramının açıkladığı yasalara göre hareket ettiği ve doğada aşağı yukarı her şeyin atomlardan ve ışıktan meydana geldiği düşünüldüğünde* doğada kuantum süreç-

* Doğrucu Davutlar neredeyse her şeyin atomlardan ve ışıktan meydana gelmediğine dikkat çekecektir. Nihayetinde evrenin yaklaşık yüzde 68'i karanlık enerji ve yüzde 27'si karanlık maddedir. Ancak gerçekten tec-

lerinin hüküm sürmesi kaçınılmazdır. Kuantum fiziği atomların neden mevcut olduklarını ve neden kendi içlerine çökmediklerini açıklar. Yani bir tavşanın koşuşturmasını seyreder veya bir orkidenin güzel yapısını incelerken kuantum kuramının bir ürününü gördüğünüzü söyleyebilirsiniz. Ancak bu, doğanın bileşen kısımlarını açıklayan sadece temel seviyedir. Kuantum kuramı atomların yapısı ve davranışlarını açıklayan temel seviyeden çok daha yüksek seviyelerde de uygulanır.

Bunun belki de en dramatik örneği Güneş'tir. Çok uzakta olmasından ve sadece gökyüzünde parlak bir ışık olarak gözükmesinden ötürü Güneş'in Dünya'daki yaşam üzerindeki önemini hafife alma eğilimindeyiz. Bu her zaman böyle olmamıştır. Eski medeniyetler Güneş'e tanrı olarak boşuna tapmamışlardır. Toprağa daha yakın oldukları için Güneş'in ekinlerinin büyümesindeki öneminin farkındaydılar. Ve ellerinde yapay ışık kaynakları yokken görmelerine olanak veren Güneş'e minnettardılar. İster evimizde, ister sokakta, bir sokak lambasıyla ya da telefonlarımızın ışığıyla ışıktan nadiren uzak kaldığımız modern dünyada doğanın geceleri ne kadar karanlık ve korkutucu olabileceğini idrak etmemiz zordur. Zifiri karanlık bir mağarada, kurt ulumalarının arasında bir süre oturursanız Güneş'in neden bu kadar çok takdir edildiğini anlayabilirsiniz.

Ancak atalarımız dahi Güneş'in önemini hafife almışlardır. Güneş'in mevcut olmadığını, Dünya'nın uzayda dolanan yalnız bir gezegen olduğunu hayal edin. Neleri kaçırıyor olurduk? Hava durumu diye bir şey olmazdı. Hava durumu başlığı altında topladığımız olayların cereyan etmesine Güneş sebep olur. Güneş sıcaklık farkları yaratır ve bu da rüzgârı

rübe edebileceğimiz kalan yüzde 5 (yüzde 95'i, bırakın tecrübe edilmeyi, gözlenmemiştir bile) atomlar ve ışıktan oluşur.

oluşturur; suyu buharlaştırır ve bu da bulutları oluşturur, bulutlar da yağmur yağmasını sağlar. Güneş olmasa Dünya'nın sıcaklığı –250°C'nin altına düşerdi. Bir oksijen atmosferi asla oluşmazdı ve fotosentez de meydana gelmezdi. Ancak bunları bir bir saymak anlamsız çünkü Güneş olmasa Dünya da olmazdı. Güneş'in kütleçekimsel etkisi olmaksızın, Dünya'yı oluşturmak için bir araya gelen materyal uzayda dağınık halde kalırdı. Mevcudiyetimizi Güneş'e borçluyuz.

Güneş kaç yaşındadır?

Güneş'i gözlemleyenler bir süre sonra onu sadece gökte parlayan bir ışık olarak görmekle yetinmeyip, onun bir ateş olduğunu düşündüler. Böyle parlayan şey başka ne olabilirdi? Ancak gökte yanan büyük ateş sorunlu bir fikirdir çünkü hepimiz ateşlerin sonsuza kadar yanmadığını biliriz. Bu sorun, 19. yüzyılda, Kutsal Kitap'a göre MÖ 4004 yılında yaratılmış olması gereken Dünya'nın bu tarihten çok daha uzun zaman öncesinden bu yana var olduğu anlaşıldığında daha da büyüdü. Bundan iki etmen sorumluydu. Biri jeolojiydi. Erozyonun kendi zamanlarında nasıl iş gördüğünü gözlemleyen jeologlar, görmüş olduğumuz doğal oluşumların yüz milyonlarca yıl boyunca erozyona maruz kalmış olması gerektiğini tahmin edebilmişlerdi. O çağda insanların Güneş'in yaşıyla ilgili bir başka korkulu rüyası ise evrimdi. Darwin doğal seçilim ile evrim sürecinin, türlerin evrilmesi için yüz milyonlarca yıl gerektireceğini açıkça belirtmişti.

Fizikçiler Güneş'in nasıl olup da bu kadar uzun zamandan beri parladığına bir açıklama bulmaya çalışıyorlardı. Bunların başında da William Thomson (Lord Kelvin) geliyordu. Kelvin ilk olarak Güneş'in sadece yanıyor olduğu olasılığını göz önüne almıştı, ancak eğer kömürden olsaydı (şimdi ap-

talca geliyor ancak o zamanlar ciddi olarak düşünülmüştü) sadece birkaç bin yıl dayanabilirdi ve mümkün olan en iyi enerji/ağırlık reaksiyonuyla dahi bu kadar hidrojen ve oksijenle en iyi ihtimalle 20.000 yıllık bir ömrü olabilirdi. Bu Dünya üzerinde gözlemlenmiş olan herhangi mantıklı bir modelden çok daha kısaydı. Ve Dünya'nın Güneş'ten çok daha yaşlı olduğunu düşünmek çok komikti. Kelvin Güneş'in ona çarpan meteorlarla dışarıdan ısıtılma ihtimalini dahi düşünmüştü. Ancak bu ısı üretiminin sağlanabilmesi için bir asırda Dünya'nın iki katı kadar maddenin Güneş'e çarpması gerektiğini hesaplamıştı. Güneş'in kütlesinin sürekli artması gezegenlerin yörüngelerinde ciddi değişikliklere yol açardı ama böyle bir değişim hiç gözlemlenmemişti. Bu durum Kelvin'i düşünebildiği tek olasılıkla baş başa bıraktı.

Güneş'in kütleçekimiyle bir araya gelen bir gaz bulutundan meydana gelmiş olduğunu öne sürdü. Atomlar birbirlerine yaklaşarak sıkıştıkça sıcaklık artacaktı. Bisiklet pompasını çok kullanırsanız ne olur? Isınır değil mi? Kelvin'e göre, sıkışmadan ileri gelen bu ısı öyle bir seviyeye çıktı ki, Güneş oluşum sürecinde aşırı ölçüde ısındı ve tıpkı fırında ısıtılmış olan bir demir parçasının alevlerin içinden alındıktan çok sonra dahi parlayıp ısı yaymaya devam etmesi gibi ömrünü bu ısıyı yayarak geçirdi. Kelvin, zamanla sönmeye başlasa bile, devasa kütlesi sayesinde, Güneş'in yaklaşık 30 milyon yıl boyunca ışımaya devam edeceğini hesaplamıştı.

Bir açıdan, Kelvin'in fikri çok akıllıcaydı. Hâlâ bu sıkışmanın kütleçekiminin etkisiyle meydana geldiğini, ısı ve basınç yarattığını ve Güneş gibi yıldızların bu şekilde oluştuğunu düşünüyoruz ama yanmaya devam etmelerinin sebebi bu değildir. Ancak 30 milyon yıllık bu zaman ölçeği Kelvin'i jeologlar ve Darwin ile karşı karşıya getirdi. (Mülayim bir adam olan Darwin, Kelvin'e meydan okuyacağına, çatışma çıkma-

sından korkarak, *Türlerin Kökeni*'nin sonraki baskılarından evrimin süresine atıf yapan ifadeleri çıkarmıştı. Özel konuşmalarında Kelvin'den "iğrenç hayalet" olarak bahsediyordu.) Sonuç bir tür çıkmazdı. Dünya'nın oluşumunu açıklamaya çalışan mevcut kuramlar, Güneş'in daha önce varlığa gelmiş olmasını gerektiriyordu. Var olan tek açıklama Güneş'in yaşının 30 milyondan daha küçük olduğunu söylüyordu, ancak Dünya'nın yaşının bundan yüz milyonlarca yıl daha büyük olduğuna dair kanıtlar birikmeye devam ediyordu. Hatta günümüzde Dünya'nın yaklaşık 4,5 milyar yaşında olduğunu biliyoruz.

Füzyonun gücü

Bu muammanın çözümü, Güneş'e güç sağladığı düşünülen yeni bir yolun bulunmasıyla geldi. Yoğun sıcaklık ve basınç altında hidrojen iyonları, ağırlıkta kendisinden sonra gelen element olan helyumu oluşturmak için birleşebilir. Bu süreçte enerji açığa çıkar. Bunu Güneş ölçeğinde düşünürseniz milyarlarca yıl boyunca enerji üretebilecek bir cisme sahip olursunuz. Güneş 10 milyar yıllık bir yaşam süresinin ortalarında gözükmektedir. Nükleer füzyon süreci bir kuantum süreci olup Dünya'nın, insanın ve doğanın var olmasında kuantum kuramına önemli bir sorumluluk yükler, ancak Güneş'in nasıl işlediğinin açıklanmasında oynanacak bir kuantum kartı daha vardır. Füzyon gerekli enerji miktarını üretebilecek bir süreç olsa bile Güneş'in kalbindeki ısı ve basıncın dahi füzyonu başlatamayacağı ortaya çıkmıştır.

Helyum üretmek için dört protonun (her biri, elektronu alınmış hidrojen atomunun çekirdeği olan birer hidrojen iyonudur) yakın mesafede bir araya gelmesi gerekir. Gerçek süreç biraz karmaşık olup önce helyumun bir izotopu olan hel-

yum-3 meydana gelir, daha sonra helyumla birleşerek kararlı helyum-4 oluşturur ve bir çift proton salar. Ancak esas sonuç dört hidrojen iyonunun bir helyum iyonu haline gelmesi ve bu esnada enerji üretmesidir. Bu hidrojen iyonları protonlar olup pozitif yüklüdürler, yani birbirlerini iterler. Birbirlerine yaklaştıkça itme gücü daha kuvvetli hale gelir. Ama güçlü nükleer kuvvet devreye girdiğinde birleşebilirler. Ancak bu kuvvet, çok kısa mesafeler haricinde etkili değildir, bu sebeple protonlar birbirlerine komik derecede yaklaşmalıdırlar.

Kuantum fiziğinin tuhaflığı burada işe karışır. Schrödinger'in denkleminin bize zamanla bir parçacığın olası konumlarının yayılacağını söylediğini aklınızda tutun. Yani iki proton birleşebilmeleri için birbirlerinden uzakta tutulsa da aslında zaten birbirlerine yeteri kadar yakın olmaları olasılığı da mevcuttur ve bu küçük ihtimalin gerçekleştiği vakalarda füzyon meydana gelir. Bir başka bakış açısı, protonları birbirlerinden ayrı tutan ve sürece ismini veren elektromanyetik itmeyi bir bariyer olarak düşünmektir. Birkaç proton, aradaki mesafeyi aşmadan bariyerin diğer tarafında belirme anlamına gelen kuantum mekanik tünelleme adı verilen bir sürece girer. Bariyerin diğer tarafına sıçrarlar ve oradaki iyonlarla birleşirler.

Bu tünellemenin gerçekleşme olasılığı düşük olsa da Güneş'te o kadar çok proton mevcuttur ki her saniye birkaç milyon tanesi birleşmektedir. Ve bu tuhaf kuantum etkisiyle olur. Tünelleme olmadan Güneş'te füzyon reaksiyonu meydana gelmeyecektir. Güneş vermiş olduğu enerjiyi üretemeyecektir. Bu, iklimlerin ve oksijenin var olmaması ve Dünya'ya çok ama çok düşük sıcaklıkların egemen olması anlamına gelir. Bu eşsiz kuantum süreci olmaksızın yaşam olmayacaktır.

Muktedir kılan enzimler

Kuantum süreçlerinin daha önce beklemediğimiz yerlerde aniden ortaya çıktıklarını keşfetmekteyiz. 1970'lerde ulaşılmış bulgulara iyi bir örnek enzimlerin katalizör olarak çalışmasıdır. Enzimler, insan vücudu dahil canlı varlıkların içlerindeki kimyasal reaksiyonlarda yer alan büyük organik moleküllerdir. Enzimlerin çoğu proteindir. Örneğin enzimler besinleri sindirmemize yardımcı olurlar. Bazı kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için katalizör görevi görürler. Enzimler katalizör görevi görmese, bu reaksiyonlar yaşamı destekleyebilecek hıza ulaşamazlar.

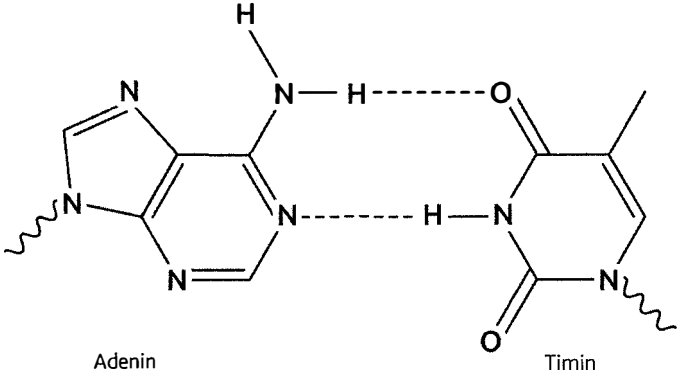
Katalizörler reaksiyon için gereken enerji miktarını azaltarak kimyasal reaksiyonların daha kolay işlemesini sağlar, ancak katalizör reaksiyonun nihai ürününün parçası olmadığından tekrar kullanılmak üzere serbest kalır. Örneğin bir katalizör bir kimyasal bağın doğasını değiştirebilir veya çok daha reaktif bir ara ürün oluşturmak için bileşenlerden biriyle birleşebilir. Bazı enzimlerin etkinliğinde bir proton veya bir elektron, aynı Güneş'teki protonlar gibi tünellemeye girer. Tünelleme olmaksızın sadece reaksiyonun meydana gelmesini engelleyen bariyeri geçmek için yeterli enerjiye sahip protonlar veya elektronlar başarılı olacaktır. Kuantum etkisi sayesinde yeni bir reaksiyon meydana gelmez, enzim sadece beklenenden çok daha hızlı, genellikle binlerce kat daha hızlı bir reaksiyon sağlar. Bu kuantum desteği olmaksızın insanlar dahil pek çok biyolojik organizma işlev göremez.

Hepsi DNA'da

Kuantum tünellemesi her canlı varlığın biyokimyasının çok önemli bir kısmı olan DNA mutasyonunda rol alıyor gibi gö-

rünmektedir. Mutlaka biliyorsunuzdur ama tekrar etmekte fayda var: DNA (deoksiribonükleik asit) genetik bilgimizi taşıyan molekül ailesidir. Bizim inşa edilebilmemiz için gerekli olan talimatları içerir ve genlerimizle çocuklarımıza geçer. Organizmanın büyümesi için bir hücre ikiye bölündüğünde DNA kendisini baştan sona ikiye ayırır, iki yarı üretmek için yapısındaki döner merdiveni açar. Bunlar özdeş değildir ancak birbirlerini tamamlarlar.

DNA döner merdiveninin her "basamağı" bazlar olarak bilinen dört organik bileşikten iki tanesi tarafından oluşturulur: sitozin, guanin, adenin ve timin. Bunlar her zaman aynı şekilde çift oluştururlar: sitozin guanin ile ve adenin timin ile. (Eğer onları, kendilerini temsil eden büyük harfler, C, G, A ve T olarak düşünürseniz, yuvarlak harfler ve düz çizgili harfler kendi aralarında çift oluşturur.) Bu şekilde, DNA'nın eksik olan yarısı, mevcut olandaki bazlar sayesinde tamamlanabilir.



Şekil 2. Hidrojen bağını (kesik çizgiler) gösteren A-T baz çifti

DNA "çözülene" kadar baz çiftlerini bir arada tutan bağa hidrojen bağı adı verilir. Suyun kaynama noktasını beklenmedik şekilde yükselterek, su moleküllerini bir arada tutan

bağla aynı türden bir bağdır. Hidrojen bağı, bir molekülün göreli olarak pozitif yüklü kısmının başka bir molekülün göreli olarak negatif yüklü olan kısmı ile etkileşime girdiği elektriksel bir etkidir. Su söz konusu olduğunda pozitif taraf, su molekülü içindeki bağı oluşturmak için kullandığı tek bir negatif elektronu olan hidrojen, negatif kısım ise oksijendir.

DNA'da her baz çiftini birbirine bağlayan hidrojen bağları bulunmaktadır. Her çiftte bağın bir tarafında bir hidrojen çekirdeği (tek bir proton) vardır. Bu proton bir kuantum parçacığıdır ve bunun anlamı, bağın diğer tarafına tünellenerek diğer bileşiğin parçası olabileceğidir. Yani mesela A'nın T ile bağlandığı bir çiftte A'dan bir hidrojen çekirdeği T'ye doğru tünellenebilirken T'den bir hidrojen, ikinci bağ yoluyla A'ya geçer. İki bazın da formülü değişmemiştir ancak yapı artık farklıdır. Bunun anlamı DNA çözüldüğünde A varyantının T yerine C ile bağ yapabilecek kadar şekil değiştirmiş olduğudur. DNA'nın elde edilen bu yeni kopyası organizmada gelişimi kontrol eden bir değişimle sonuçlanabilir.

Bu süreç henüz deneysel olarak doğrulanmamış olsa da bu çeşit bir mutasyonun arkasında böyle bir mekanizmanın bulunma olasılığının yüksek olduğuna inanılmaktadır. Ve eğer doğruysa, bir kuantum sürecinin canlı hücrelerde doğrudan değişikliklere sebep olduğu anlamına gelmektedir. Bu derecede yüksek seviyedeki kuantum etkisi başlangıçta beklenmemiştir çünkü sıcak, ıslak biyolojik çevrenin "düzensizliği", uyum kaybolması (kuantum parçacıklarının çevrelerindeki diğer parçacıklarla etkileşime girmeleri ve tuhaf bir kuantum modeli yerine günlük hayatta karşılaştığımız nesneler gibi "klasik" bir şekilde hareket etmeye başlaması süreci) olmadan kuantum etkilerini gözlemek için gerekli olan, dikkatli bir şekilde kontrol edilmiş koşulların tamamen zıddıdır.

Bitki ışığı

Bitkilerin ışığı enerjiye çevirdiği fotosentez süreci en dramatik ve önemli biyolojik süreçlerden biridir ve yüksek seviyede kuantum etkileri içermeye yatkındır. Daha sonra yine göreceğiz: Işık ile madde arasındaki herhangi bir etkileşim, bir atom veya elektronu içeren her şey gibi kuantum mekaniği kapsamına girer. Ancak yakın zamandaki fotosentez araştırmaları, kuantum fiziğinin muhtemelen daha işlevsel bir rolü olduğunu göstermektedir.

Kuantum mekaniğinden ileri gelen herhangi bir tuhaflık içermese bile, fotosentez, doğal teknolojinin bir mucizesidir. Bitkiler ışığa maruz kaldıklarında takdire şayan bir şeyler olduğuna dair ilk ipucu, Joseph Priestley tarafından kazayla yapılan bir keşiftir. Başını belaya sokmadan duramayan bu din adamı, 1770'lerin ortalarında Shelburne Dükü'nün malikânesi Bowood House'da alışılmadık bir kütüphanecilik işi almıştı. Shelburne, Priestley'nin dostluğu ve muhabbetini kazanması karşılığında onun, havanın ve bileşenlerinin doğası hakkındaki merakını gidermesine yardımcı olmaya hazırdı. Shelburne muhtemelen ziyaretçilerine gösteriş yapabilmek amacıyla kütüphanesinin yanındaki küçük bir odayı Priestley'e deneylerini sürdürmesi için tahsis etmişti.

Priestley genellikle oksijenin kâşifi olarak bilinir, ancak kendisi flojiston kuramının bir destekçisi olduğundan oksijenin varlığını fark edemezdi. Bu kuram, maddenin içerisinde, yanarken salınan flojiston adında bir parça olduğunu öne sürmekteydi. Örneğin hava sadece bir dereceye kadar flojiston tutabilirdi ve yanan bir mumu bir cam fanusun içine koyduğunuzda hava flojistona doyunca mum sönerdi. Mumun sönmesinin gerçek sebebi, havadaki oksijenin tükenmesidir; flojiston bir çeşit anti-oksijendir. Priestley cam fanusa konulan bir farenin de havayı flojistonlaştırdığını ve farenin ba-

yılmasına sebep olduğunu, ancak fareyle birlikte fanusa yeşil bir bitki konulduğunda bu "yaralı hava"nın iyileştirildiğini ve farenin hayatta kaldığını keşfetmişti.

Priestley'nin bir şeyler yandığında veya bir hayvan soluk alıp verdiğinde azalan veya sınırlı hale gelen bir şeyi bitkilerin bir şekilde telafi ettiğinin farkına varmasından sonra, ancak 18. yüzyıl sonlarına doğru Fransız papaz Jean Senebier ve İsviçreli Theodore de Saussure "yaralı hava"nın yanma veya solunumla üretilen karbondioksit olduğunu ve bitkilerin bu gazı ışık etkisi altındayken oksijen ve karbon temelli moleküllere dönüştürebileceğini gösterdiler. Artık Güneş'in fotosentez ile, fotosentezde kullanılan güneş enerjisinin yarısından fazlasını tüketen algleri ve yeşil bitkileri doğrudan etkileyerek ve karmaşık besin zincirimizde bitkileri yiyen (veya bitkileri yiyen hayvanları yiyen) hayvanları da dolaylı yoldan etkileyerek Dünya'yı etkili bir şekilde beslediğini biliyoruz.

Büyük bir reaksiyonlar zinciri içeren fotosentezin fiziği ve kimyası karmakarışıktır. İlk olarak ışık, bitkilerdeki yeşil klorofil gibi belirli renklere sahip moleküllerdeki elektronların enerji seviyelerini yükseltir. Bu enerji, oksijen üreten ve karbonu bitkinin yapısına katan fotosentez reaksiyon merkeziyle kimyasal forma çevrilir. Bu hassas sürecin adımlarından bir tanesi, saniyenin trilyonda birinde meydana gelmekte olup bilinen en hızlı kimyasal reaksiyondur.

Kuantum dünyasının tuhaflıkları, enerjinin yolculuğu sırasında sahneye çıkar. Enerji klorofildeki bir elektronu ilk kez uyardıktan sonra karbondioksiti şekere dönüştürmek (ve bu değiştokuş esnasında biraz oksijen salmak) üzere reaksiyon merkezine gelir ve burada çalışır. Enerjinin yolda molekülden moleküle geçişi, kuantum parçacıklarının dalgalar gibi davranmasının sonucudur. Uyarılmış enerji yüklü ilk elektron dalgası sonraki moleküle uzanarak uyarılmayı iletir ve bu

böyle sürer. Dahası bu dalgalar sarhoş gibi hareket etmezler, aksine üst üste binip ahenk gösterirler; dalgaların bir lazeri çalıştıracak şekilde hep birlikte titreşmesi bu duruma bir örnektir (*bkz.* sayfa 129).

Var olduğu bir süredir tahmin edilen ve büyük bitki numuneleri arasında varlığına işaret eden zayıf olsa da bir miktar kanıt toplanmış olan bu ahenkli davranış, ancak 2013 yılında İspanya ve Glasgow'daki araştırmacıların, moleküler seviyede fotonları kimyasal enerjiye dönüştüren reaksiyon merkezlerinin ayrıntılı çalışmalarını gözlemlemek için lazerleri ışık üreten moleküllerin her birine ayrı ayrı yöneltmesiyle nihai olarak keşfedilmiştir. Işık hasat eden mor bakteriler üzerindeki deneyler de kuantum parçacığının olasılığa dayalı olarak tüm yolları keşfettiğini ve organizmanın parçaları hareket ederken bağlantıların değişmesi anlamına gelen en iyi yolu bulduğunu, süreci sürekli olarak düzenlediğini ve dönüşümün, (gelecekte fotovoltaik pilin geliştirilebileceğini ima ederek) bir güneş pilinden çok daha yüksek, neredeyse yüzde 90'lık verime ulaştığını göstermiştir.

Güvercin pusulası

Bir başka kuantum etkisi, daha az kesin ancak nefes kesici bir olasılıkla doğanın mucizelerinden birinin arkasında yatar; posta güvercinleri gibi kuşlar, doğal bir pusula yardımıyla Dünya'nın manyetik alanını fark ederek yollarını bulabilirler. Bu esrarengiz beceri gagalarındaki manyetik parçacıklarla ilişkilendirilmiştir ancak sürecin kuşun gözünün retinasına ışık vurmasıyla tetiklendiğine işaret eden daha güçlü kanıtlar da mevcuttur. (Aslında şimdiye kadar üç mekanizma öne sürülmüştür ve güvercinlerin üçünün bir bileşimini kullanıyor olması tamamen olasıdır.)

Işık kuşun gözündeki reseptöre ulaştığında, bir molekülü iki serbest radikal oluşturacak şekilde ikiye bölmek için kullanılır. Bunlar bağ yapmamış bir elektronu olan oldukça reaktif moleküllerdir (hücreye hasar vermesi antioksidanlar ile engellenen serbest radikallerdirler). Bu elektronlar, bir manyetik alandan etkilenmeleriyle ortaya çıkan "spin" (ya da "hızla dönme") adlı kuantum özellikleri sayesinde küçük manyetik pusulalar olarak iş görebilirler. Genellikle radikallerden biri en yakın atomun çekirdeğine daha yakın olacak ve bu yüzden manyetik alanı diğerinden daha az hissedecektir. İki radikal arasındaki bu fark kimyasallara farklı bir reaktiflik seviyesi vererek kuşun bu etkileşimden, belki de retinada bir kimyasalın sentezlenmesiyle bir çeşit geri bildirim almasını sağlayacaktır. Bağ oluşturmayan iki elektron birbirlerine bir kuantum yöntemiyle bağlanarak dolaşık hale getirilir ve bu dolaşıklık, etkiyi artırmaya yardım edebilir.

Düşünüyorum, öyleyse kuantumum

Kuantum kuramı ile biyoloji arasında en uç noktadaki (ve en çekişmeli) örtüşme, bilincin kendisinin bir kuantum fenomeni olduğu iddiasıdır. Elde bu kurama temel oluşturacak hiçbir doğrudan kanıt olmasa da bilinçli zihin fenomenini konvansiyonel fizik kullanarak açıklamak mümkün değildir ve dolaşıklık gibi kuantum etkileri gereklidir. Önerilerden "uyarlanmış nesnel azalma" gibi garip bir ismi olan bir tanesi, fizikçi Roger Penrose ve Doktor Stuart Hameroff'tan gelmektedir.

Penrose beynin, kuantum kuramının kalbindeki olasılıkçı doğayla, konvansiyonel mekanizmalar kullanılarak mümkün olmayacak olan hesaplamaları yapabileceğini öne sürmüştür. Bir anestezist olan Hameroff beyindeki nöronları destekleyen yapı olan hücre iskeletinin, özellikle de hücre iskeletinin

bir parçasını oluşturan ince polimerler olan mikrotübüllerin, elektronların mikrotübüller arasında tünellenebileceği kuantum sistemleri olarak iş görebileceğini öne sürmüştür.

Bilincin kuantum etkilerini içeriyor olduğu fikri, olasılığın sınırlarını zorluyor gibi gözükmemektedir ancak son söz henüz söylenmemiştir. Bilincin ne olduğunu veya arkasında ne tür bir mekanizma bulunduğunu, henüz kuantum etkilerine ne kadar bağlı olduklarını keşfedebilecek kadar iyi bilmiyoruz. Ancak, insan davranışının bazı yönlerini daha iyi anlayabilmek için kuantum kuramının arkasındaki matematiği kullanmayı denememiz için hiçbir sebep yok.

Kuantum oylama

İsveç'teki Linnaeus Üniversitesi'nden Andrei Khrennikov ile Leicester Üniversitesi'nden Emmanuel Haven, kuantum uyumsuzlaşmasını tanımlamak için kullanılan matematiği alarak Amerikan politika sistemine uyguladılar. Özellikle başkanlık ve kongre seçimlerinde seçmenlerin Cumhuriyetçi ve Demokratlar arasında nasıl tercih yaptıklarına baktılar. Bir seçmenin ruh halinin, her birine belirli bir olasılık verilmek suretiyle "Demokrat" ve "Cumhuriyetçi" hallerinin bir süperpozisyonu olarak düşünülebileceği ve iki seçimin, sanki dolaşık kübitlermiş (kuantum bilgisayarlarının işlemci birimleri; *bkz.* sayfa 223) gibi algılanabileceği fikrini ortaya attılar. Bu onlara, basın yayın organlarına maruz kaldıklarında seçmenlerin ruh hallerinin dinamiklerini keşfetmek için bir araç sağladı.

Konuşmak için henüz çok erken ancak böyle bir aracın nasıl düşündüğümüzü ve kararlar aldığımızı biraz olsun anlamamızı sağlayabileceğine dair kanıtlar mevcuttur. Bu yaklaşımın etkili olduğu ortaya çıksa dahi, bu, karar almanın ku-

antum fiziğine bağlı olduğuna dair bir kanıt oluşturmaz. İşin matematiğinin bir model olarak iyi işlemesinin sebebi muhtemelen hem politik durumun hem de kuantum parçacıklarının halinin, sadece birkaç durumda bulunabilen ve konu politika olup oy verildiğinde tek bir sabit değere "çökmesi" gereken niteliklerin olasılıklarının ölçülmesiyle ilgili olmasıdır. Ancak bu, kuantum fiziğinin gücünün biyolojik süreçler hakkında öngörü verebilmesi için izlenecek yollardan sadece biridir.

Biyoloji, basit gözlemden başlayıp büyüyerek gerçek bir bilime dönüşen bir disiplindir ve doğada neler olup bittiğini açıklar. Bu uğraş biyolojik yapı içerisinde neler olup bittiğine ilişkin ayrıntılı bir bilgi birikimi oluşturmayı içerir. Bu ayrıntılar arasında öyleleri vardır ki önünde sonunda kuantum etkileriyle ilişkili oldukları keşfedilecektir. Basit gözlemlerle başlayan, ancak saf kuantum olan başka bir alan ise elektrik âlemidir. Şimdi kuantum kuramının kimden elektrik aldığına bir göz atalım.

BÖLÜM 3

ELEKTRON ÂLEMİ

Londra'daki Royal Society'de, yağ lambalarının titrek ışığıyla aydınlanan bir amfide, tuhaf bir gösteri sürmekteydi. Bu, gizli bir cemiyet tarafından yürütülen tuhaf, ahlaksız bir ritüele benziyordu. Bir oğlan, ipek halatlarla tavandan sarkıtılmıştı. Ziftle kaplanmış bir varilin üzerinde duran bir kız çocuğuna dokunmak için elini uzatıyordu. Kız da elini, adeta sihirli bir şekilde bir masanın üzerinden havalanıp kendisine doğru yaklaşmakta olan bir demet tüye uzatıyordu.

Felsefe amberi

Toplanan üyelerin şahitlik etmekte oldukları şey, 18. yüzyılda "elektrikli çocuk" olarak bilinen popüler bir bilimsel gösteriydi. Çocuğun ayaklarına, elle çalışan ve statik elektrik üretmekte olan bir araçla elektrik yükleniyordu. Elektriğin tam olarak ne olduğundan kimse emin değildi. Ancak onun çocuğun içinden geçip kıza tüyleri kaldırabilme becerisini veren *bir şey* olduğu kesindi. Bu etki genellikle camdan yapılmış dönen bir disk veya kürenin yün gibi uygun bir kumaşa sürtülmesiyle üretilmekteydi, ancak daha önceleri amber

kullanılmaktaydı, ki bu da "elektriğe" ismini vermektedir, çünkü Yunanca'da amberin karşılığı *elektron*'dur. Bunun neden meydana geldiğine dair kesin bir açıklama yapılamamıştı ancak bu eylemin, vücuttan geçebilecek bir çeşit görünmez bir sıvı ürettiği sonucuna varılmıştı.

Elektriği su gibi davranan bir şey olarak düşünmek saçma gözükebilir; nihayetinde tost makinesini fişten çıkardığımızda prizden dışarı bir şey akmaz. Yine de bir akışkan için uygun olan kelimeleri rahatça elektrik için de kullanırız; elektrik akımından sanki bir nehir akıntısıymış gibi bahsederiz.

Bilimsel anlayıştaki her büyük gelişme gibi, elektrik ve kuzeni manyetizma hakkındaki anlayışımıza katkıda bulunan pek çok kişi olmuştur. Ampère ve Oersted gibilerle zaman öldürebiliriz ancak 18. yüzyıldaki acayip gösteriden 20. yüzyılda elektriğin bir kuantum fenomeni olduğu anlayışına ulaşılması yolundaki mihenk taşlarını gözden geçirmek için sadece üç kişinin çalışmalarına göz atmak yeterlidir. Bunların ilki Michael Faraday'dır.

Albemarle Sokağı büyücüsü

Faraday pek çok açıdan dikkat çekicidir. Günümüzde bir fizikçiden üniversite eğitimi almış olmasını ve matematiği iyi kavramasını bekleriz. Faraday'da ikisi de yoktu. Onun zamanında bir bilim insanı olmak, bilimle amatörce ilgilenen bir zengin olmak anlamına geliyordu. Faraday'ın beş kuruşu yoktu. İş arayışı içerisinde Westmoreland'den Londra'ya taşınmış bir demircinin oğlu olan Michael Faraday, 1805 yılında on dört yaşındayken bir ciltçinin yanına çırak olarak girdiğinde kendini şanslı hissediyor olmalıydı. Ona nihayetinde iyi bir gelir kazandıracak saygın bir meslek öğreniyordu ve hayatını dönüştürmekte önemli bir rol oynayacak olan Şehir

Felsefe Topluluğu adlı bir okuma-tartışma kulübüne katılma fırsatı bulmuştu.

Faraday Topluluk'ta katılmış olduğu toplantıları dikkatle kaydetti ve işvereninin izniyle bu kayıtları deri kaplı bir cilt haline getirdi. Ustası bundan o kadar etkilendi ki notları Kraliyet Enstitüsü'nü ziyaret etmekte olan pek çok kişiden biri olan zengin bir müşterisine gösterdi. Kraliyet Enstitüsü (KE), asortik Piccadilly'nin hemen yakınlarında Albemarle Sokağı'nda gıcır gıcır bir kuruluştu ve hem bilimsel araştırmayı ön plana çıkartıyor hem de halkı bilimi anlamaya teşvik etmek için dersler veriyordu. Bay Dance adlı müşteri, Faraday'a KE'nin Victoria çağındaki en parlak çocuğu Humphry Davy'yi izlemesi için bilet ayarladı. Bu Faraday'a öylesine ilham verdi ki Davy bir kaza sonucu geçici olarak kör olduğunda büyük adamın sekreteri olma fırsatını yakaladı. Faraday çok geçmeden Davy'nin önce laboratuvar asistanı ve görevli şahıs sarhoşluk sebebiyle kovulduktan sonra da baş kâhyası oldu.

Wollaston'un divaneliği

Faraday Kraliyet Enstitüsü'ne hızla yerleşti ve iyi bir eğitim almamış olmasına rağmen büyük ilerleme kaydetti. 1821'e dek terfi etmiş, evlenmiş ve Enstitü'de, kendisinden önce Davy'nin işgal etmiş olduğu odalara yerleşmişti. Her şey tozpembe gözüküyordu, ancak elektrik ve manyetizma alanındaki ilk büyük keşfi, peri masalını andıran başarısını tehdit ediyordu. Davy, Faraday'dan elektrik ve manyetizma alanındaki mevcut bilgi birikimini yazıya dökmesini istemişti ancak işi kendi eline almayı seven biri olan Faraday, raporlarını gördüğü deney sonuçlarını yazmak yerine deneyleri kendisi tekrarladı. Bu deneylerden birinde bir mıknatısın yanında duran telden elektrik akımı geçirmişti. Tel mıknatısın etrafında da-

ireler halinde hareket etmeye başladı. Faraday'ın özetlemek için uğraştığı literatürde bu olaydan söz edilmiyordu.

Doğal olarak heyecanlanan Faraday ulaştığı sonuçları aceleyle yayınladı ancak Kraliyet Enstitüsü'nün daha yaşlıca bir yöneticisi olan William Wollaston'un keşfini çalmakla suçlandı. Wollaston elektriğin teller üzerinde tirbuşon sarmalı şeklinde ilerlediğine dair bir kuram geliştirmişti. Davy'den bunun için bir kanıt bulmasını istemiş fakat bu kanıt bulunamamıştı. Şimdi Faraday elektrikle alakalı dairesel bir hareket keşfettiğini iddia ediyordu. Wollaston hiç şüphesiz fikrinin Faraday tarafından çalındığını düşünüyordu (aslında kendi kuramı ne doğru olduğu ne de Faraday'ın bulgularıyla bir bağlantısı olduğu için bu düşüncesi çok yersizdi).

Hile yapıldığı iması, derin dini inançları olan Faraday'ı dehşete düşürmüştü. Wollaston'un kuramının, kendi deneysel sonuçlarıyla hiçbir benzerlik taşımadığının farkında olarak, destek umuduyla eski akıl hocası Humphry Davy'ye yöneldi. Ancak Davy, işçi sınıfından Faraday'ı desteklemek yerine arkadaşı ve sosyal dengi Wollaston'un yanında durdu. Sosyal bölünme, bilimsel gerçekliğin önüne geçti. Bu, iki kişi arasındaki arkadaşlığın sonu olmuştu. Örneğin Faraday Kraliyet Topluluğu'na seçildiğinde ona sadece bir kişi karşı çıkmıştı: Davy. Ancak bilim camiası, keşfin Faraday'a ait olduğundan emindi. Wollaston'un kuramıyla bağlantısı olmayan orijinal çalışmayı yapmış olmanın yanı sıra elektrik motorunun temellerini de atmıştı.

Dünya çapındaki bu desteğe rağmen Faraday, yaşanan tatsızlık sebebiyle elektrik ve manyetizmaya on yıllığına ara vererek kimyaya odaklandı ve sabah dokuzda başlayan Cuma Dersleri'ni (katılımcıların smokinle gelmesi gerektiğinden dersler bir pandomim gibi geçiyordu) ve 20. yüzyılda televizyondan yayınlanacak versiyonu Britanyalı genç bilim in-

sanlarının çoğu için ilham kaynağı olacak olan Çocuklar için Noel Dersleri'ni başlatmasına olanak veren idari bir görev üstlendi. Ancak elektrik ve manyetizmanın çekiciliği kaybolmamıştı. 1831 yılında, bir teldeki bir elektrik akımının belirli bir uzaklıkta olsa da başka bir telde neredeyse sihirli bir şekilde ikinci bir akım üretmesiyle ilgili deneyleri işiten Faraday, şeytana uyup bu alana geri döndü.

Yeni nesil

Faraday iki tane tel sarmalı hazırlayıp bir tanesine akım verdiğinde, ikinci telde kesintisiz bir elektrik akımı oluşmasını bekliyordu ancak ilk sarmala akım verdiği ya da akımı kestiği anda ikinci sarmalda aralıksız bir akım yerine sadece kısa bir akım görmüştü. Manyetizmanın belirli bir mesafede etkili olduğunu ve bir elektrik teli sarmalının bir mıknatıs olarak iş görebileceğini biliyordu. Buradan ilk sarmalın manyetizma seviyesindeki değişikliklerin ikincide elektrik ürettiği sonucuna sıçradı. Sıradan, kalıcı bir mıknatısı bir sarmalın içinden geçirerek bu etkiyi tekrar üretmeyi başardı ve jeneratörü icat etti.

Yaklaşık bu zamanlarda Başbakan Robert Peel'in Faraday'a icadının ne işe yaradığını sorduğu ve Faraday'ın da ona, "Bilmiyorum ama bahse girerim bir gün gelecek hükümetiniz bundan vergi geliri elde edecek," cevabını verdiği söylenir.

Gerçi Faraday sonraki bölümlerde yine karşımıza çıkacak ama onun bu hikâyeye önemli bir katkısı daha olduğunu söylemeden geçmeyiz. Faraday'dan daha geleneksel bir fizikçi (ve modern fizikçilerin tümü) olup bitenleri matematik ortamında açıklamaya çalışırdı. Ancak Faraday bir matematikçi değildi, matematik olmadan büyük keşifler yapan muhtemelen son fizikçiydi. Mıknatısın bir kâğıt üzerine serpilmiş

demir tozlarını, iki kutbu boyunca nasıl dizdiğini görmüştü. Gaz lambasıyla aydınlatılan loş laboratuvar ortamında Faraday, bu çizgilerin mıknatıs etrafında parıldadığını hayal ediyordu.

Teli bir mıknatısa yaklaştırdığında veya bir mıknatısı sarmalın içinden geçirdiğinde tel, güç çizgileri olarak adlandırdığı şeyleri kesiyor gibiydi. Çizgiler birbirlerine ne kadar yakınlarsa tel onları o kadar çok kesiyor ve daha fazla akım oluşuyordu. Bu model, bir elektromıknatısı açıp kapatmakta çok işe yarıyordu. Elektromıknatıs açıldığında mıknatıstan güç çizgileri yayılıyor ve tel üzerinde birbirlerini kesiyordu. Kapatıldığında ise çizgiler geri çöküyor ve bunun tersi meydana geliyordu.

Elektromanyetik etkileşimleri bir güç alanı olarak hayal etmek, fizik için, sadece elektromanyetizmayı değil, kuantum kuramının temelini de anlayabilmek bakımından devasa önem kazanacaktı. Ancak elektrik ve manyetizmanın doğası hakkında keşfedilecek hâlâ çok şey vardı. Faraday'ın zarif, ancak matematiğe uymayan kavramlarını alıp ilk modern bilimsel görüş haline getiren James Clerk Maxwell'di.

Bir İskoç bilgin

Maxwell Edinburgh'da, Faraday'dan bir nesil sonra ve ondan çok farklı şartların içine 1831'de doğdu. "Bilim insanı" terimi ilk olarak ancak 1834'te kullanıldığından ve sanatçıyla sanat arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki kurulmuş olduğundan Maxwell'in ilk bilim insanı olarak görülebileceği (zayıf bir sav ile birlikte) öne sürülüyordu. O zamana kadar "doğa filozofu" ve "bilgin" gibi terimler kullanılmaktaydı. Çok kuvvetli olmasa da Faraday'ın tamamen yabancı olduğu bir yaklaşımla matematik tarafından idare edilen bilimsel kuramlara

öncülük ettiğinden Maxwell ilk *modern* bilim insanı olarak görülebilir.

Faraday oyun oynamaya doyamadan çalışma hayatına atılmak zorunda kalmışken Maxwell'in hür ve kıskanılacak bir çocukluğu oldu; en azından çocukluğunun ilk yılları böyle geçti. Ailesinin Galloway Middlebie'deki kır evi olan Glenlair'da keşifler ve deneyler yapmasına izin veriliyordu ve kristallerden sıcak hava balonlarına kadar her türlü şeyle oynuyordu. Annesi öldüğünde bu huzurlu dünya paramparça oldu. Sekiz yaşındaki Maxwell'e önce özel bir eğitmen tutuldu, ancak kısa süre sonra, yaşamakta olduğu hayattan sonra ona kesinlikle cehennemin dibi gibi gözükecek olan Edinburgh Akademisi'ne gönderildi.

Maxwell ortalamadan daha kısaydı, taşra aksanıyla kekeleyerek konuşuyordu ve spor yerine kitapları ve deneyleriyle ilgileniyordu. Bazı çocuklar yatılı okullarda kendilerini keşfederler ancak sınıf arkadaşlarının "Salak" adını taktığı Maxwell okul zorbalarının klasik hedefiydi. On altı yaşında Edinburgh Üniversitesi'ne taşınma hürriyetine ulaşana kadar buna katlandı, ondan üç yıl sonra da Cambridge'e gitti. Trinity College başkanına Edinburgh'daki Profesör James Forbes'tan gelen tavsiye mektubu onu karışık bir şekilde tanımlıyordu: "Davranışlarında biraz görgüsüz olabilir, mamafih tanışmış olduğum en orijinal gençlerden biri."

Maxwell 1854'te mezun olduktan sonra kahramanı Michael Faraday'ın adımlarını takip etmek istiyordu. Çeşitli konular üzerinde çalışacak ve başka diğer şeylerin yanı sıra ilk renkli fotoğrafı üretecekti; ancak daima hatırlanacak olan çalışması, elektrik ile manyetizma arasındaki Faraday'ın keşfetmiş olduğu ilişkiyi matematiksel olarak özetlemesidir. Bir fizikçiyle dünyanın bir tanımını yansıtan hassas denklemler hakkında

konuşursanız çoğu Maxwell'in denklemlerine işaret edecektir. Bunlar aslında sekiz adettir, ancak Oliver Heavyside ve Heinrich Hertz tarafından, evreni kavrayışımızın merkezine yerleşecek dört sade, kısa denkleme sadeleştirilmişlerdir.

Thomson'un küçük parçacıkları

Dev üçlünün son üyesi, daha sonraları Niels Bohr ile geçinemeyecek olan Manchester'lı bilim insanı J. J. Thomson'dur. Thomson on dört yaşında Owens College'e (geleceğin Manchester Üniversitesi) girdi ve bundan altı yıl sonra yoluna meslek hayatının geri kalan kısmını geçireceği Cambridge'te devam etti. Thomson'un ilgisini atomun yapısı çekiyordu (Bohr ile geçinememiş olmasını üzücü kılan budur; *bkz.* sayfa 23), ancak elektrik ve manyetizma alanında çalışmıştı ve katot ışınlarıyla ilgili çalışması 1897'de ona şöhret (ve bir de Nobel Ödülü) getirdi.

Katot ışınları ilk olarak 1830'larda (tabii ki) Michael Faraday tarafından, içindeki hava basıncı azaltılmış cam bir tüpten bir akım geçirilmesiyle gözlendi ve tüpte bir parlaklık görüldü, ancak tüpteki havanın büyük kısmı boşaltılabildiğinde, özellikle de Britanyalı bilim insanı William Crookes tarafından Crookes tüpleri üretildiğinde tam olarak incelenebildi. Tüpte iki elektrot arasında negatif katottan pozitif anoda aşağı doğru, genellikle bir Malta haçına benzeyen bir şeyler hareket ediyor gibiydi. Yolculuk eden şeyler arada sırada anodu ıskalayıp tüpün sonundaki cama çarparak yeşil bir parlaklık üretecek kadar hızlı hareket ediyor gibiydi.

Ancak tüpün içinde yol alan (ve negatif yüklü katot tarafından emildikleri için "katot ışınları" olarak adlandırılan) şey ciddi tartışma konusuydu. Crookes'un kendisi bunların tüpün içinde kalan artık havadan kaynaklanan yüklü atomlar

olduğu kuramını geliştirmişti. Heinrich Hertz'ün aralarında bulunduğu diğerleri ise bunların yeni bir tür elektromanyetik dalga, bir ışık çeşidi olduğunu düşünüyordu. Ancak Thomson, bu görünmez ışınlardaki taşıyıcı parçacıkların kütlesini ölçmeyi başardığında ve bu kütlenin sıfır değil de (yani katot ışınları, ışık değildi) atomların kütlesinin sadece küçük bir bölümü olduğunu gösterdiğinde ikisinin de yanıldığı kanıtlandı. Dahası, fotoelektrik etkiden gelenler gibi diğer elektrik yüklü parçacıklarla aynı yük ve kütleye sahiptiler.

Thomson şu sonuca varmıştı: "Korpüskül adını vermiş olduğum negatif elektrik taşıyıcıları bilinen herhangi bir elementin bir atomundan çok daha küçük bir kütleye sahiptir ve negatif elektriği üreten kaynak her neyse onunla aynı karaktere sahiptir." Thomson'ın korpüsküllerine birkaç yıl içinde George Stoney, bundan sonra anılacakları elektron adını vermişti. Thomson'ın bulduğu şeylerin sadece katot ışınlarının içeriğini değil, geleneksel tüm elektrik akımlarının bileşenlerini oluşturduğu kısa süre sonra ortaya çıkmıştı. Elektronlar metal tellerden de boşaltılmış tüplerden geçtikleri gibi geçiyorlardı.

Elektrik akımını devre şemalarında göstermenin geleneksel yöntemi olan pozitiften negatife gidişin aslında ters olduğu anlamına gelmesinden ötürü bu keşifte küçük bir mahcubiyet de mevcuttu ancak bu konu hakkında yapılabilecek pek bir şey yoktu. Elektrik hakkındaki pratik tecrübelerimize bakılırsa elektronların son derece yüksek (ışık hızına yakın) hızlarda tellerden geçip gittiğini düşünebilirsiniz. Nihayetinde bir düğmeye bastığımızda elektriğin öteki uca gitmesini, suyun borulardan geçmesini beklediğimiz gibi beklemiyoruz. Ancak elektrik iletkenliği, bir telin elektron akımı için bir yol oluşturmasından çok daha karmaşık bir olaydır.

Bir iletkenin yaşamı

En tanıdık elektrik iletkenliği bir metal yoluyla iletimdir. Metalin yapısı, metalin dış bölgesindeki elektronların kendilerini bağlı bulundukları atomlardan göreli olarak serbest bir şekilde ayırarak üzerinde uçuşabileceği bir kafese benzer. Elektronların hareketleri genellikle rastgele olup termal enerji sonucu bir şeye çarpana kadar sürer ancak eğer bir ucunu negatif ve diğerini pozitif yaparak tele elektrik uygulanırsa elektronlar pozitif kutba doğru sürüklenirler. Bu hareket şaşırtıcı şekilde yavaştır; genellikle bir saniyede sadece bir metre hareket ederler. Elektronlar aslında yürüyüş hızıyla yol alırlar.

Bir elektrik akımı oluşturmak için düğmeye bastığımızda akımın uzun bir teli geçmesinin saatler alacağını sanabiliriz; eğer tel başlangıçta boş olsaydı ve kademeli olarak elektronlarla dolması gerekseydi bu doğru olurdu. Ancak hakikatte telin tamamı elektronlar içerir. Akım bir defa oluşturulduğunda elektrik alanı, materyal içinde ışık hızında elektromanyetik bir dalga ile taşınır. Bunun anlamı elektronların tüm tel boyunca neredeyse aynı anda harekete geçiyor olduğudur ve böylece bir uçtan diğerine hareket etmelerini beklemeye gerek yoktur.

Elektronlar tabii ki kuantum davranışın tüm tuhaflıklarını göstermekte olan kuantum parçacıklarıdır, yani elektrik içeren her şey doğası gereği bir kuantum sürecidir. Bir metalin iletkenliğini düşünürken atomun bağ yapısı olarak bilinen kuantum yapısının da olaya dahil olduğunu görürüz. Mesela Bohr'un hidrojen atomu üzerinde yaptığı araştırmayı daha genişletilmiş olarak bakır atomu üzerinde yaptığımızda, bir dizi "orbital" yani bir elektronun bulunabileceği sabit enerji seviyeleri diye bir şey olduğunu ve elektronların bunların

arasında bulunan seviyeleri işgal edemeyeceğini görürüz. Katı metalin karmaşık yapısını oluşturmak için daha fazla atom bir araya getirildiğinde ilginç şeyler meydana gelir.

Tek bir atomun orbitallerinde iç kısımlardaki elektronlar bağlı oldukları atomlarla etkileşimde kalırken dışardaki elektronlar, metal cismin tümü içerisinde atomlar arasında paylaşılan orbitallere yerleşebilir. Daha fazla atom eklendikçe daha da fazla orbital mevcut hale gelir, giderek sıkışırlar ve aralarındaki mesafe ihmal edilebilir hale gelir. Elektronların metal içerisinde serbestçe dolaşabileceği aralıksız bir silsile olan bir bağ oluştururlar. Bu serbest elektronlar ısı (bu sebeple metaller ısıyı iyi iletirler) ve elektrik taşırlar.

Elektrikten elektroniğe

İlk elektronik cihazlar elektronların temel davranışlardan yararlanmıştır. Mesela bir devrede elektron akımını azaltan rezistanslar, elektronların akışındaki kolaylığı azaltmak için iletken ve yalıtkan maddelerin karışımından yapılmıştır. Elektroniğin (elektrik akımını, bilgisayarlar için gerekli olan mantık geçitlerini üretmemize yarayacak şekilde açıp kapamamıza yarayan kontrol becerisi) belirleyici başka bir yönü ise elektronların akışının yönünü kontrol edebilme ve bir akım kullanarak diğerini açıp kapama becerisidir. Elektroniğin ilk zamanlarında bu görevler, Crookes tüplerine benzeyen ancak daha işlevsel (ve çok daha küçük) olan termiyonik valflerle yürütülmekteydi (ABD'de vakum tüpleri olarak bilinirler).

Bilgisayarın kalbindeki anahtarlama rolünün temeli olan bir akımın bir diğerini kontrol edebilme becerisinin en iyi örneği triyot valfidir. Bu, geleneksel Crookes tüpüne karşılık gelen bir şeydir; elektronların katottan anoda akabilmesi için

duvarından boydan boya iki iletken geçirilmiş, bir katodu ve bir anodu olan ve havasının büyük kısmı boşaltılmış bir cam tüptür. Katot normal olarak bir valfte ısıtılacaktır, bu sebeple cihazın tipik parıltısı (ve saçtığı ısı) elektronlara ekstra enerji vererek serbestçe akmalarını kolaylaştırır. Anahtarlama becerisi, elektronların akış yolu üzerinde bulunan ızgara biçimli başka bir elektrottan gelir. Eğer bu ızgaraya negatif yük yüklenirse bu yük elektronları iterek geçmelerini engeller ve tüpteki akımı durdurur.

Triyot basit bir aç/kapa düğmesi olmanın yanı sıra bir amplifikatör olarak da iş görebilir. Izgaraya uygulanan küçük bir akım, valf boyunca akan çok daha büyük bir akımı kontrol edebilir. Yani ızgara akımındaki küçük değişiklikler, ana akımda çok daha büyük değişiklikler haline gelir. Mesela eğer ızgaradan karmaşık bir dalga formuyla bir alternatif akım geçiyor olsaydı, ana akım da bu dalga formunu taklit ederdi ancak daha büyük olurdu ve radyolar ile müzik setlerinin radyo dalgaları veya bir gramofon kaydındaki iğnenin kristal üzerine bastırıldığında piezoelektrik adı verilen bir süreçle elektrik üretmiş olduğu bir kayıttan gelen göreli olarak zayıf sinyali artırmasına olanak verecek şekilde çok daha büyük olurdu.

Valfler işe yarıyordu. Arada sırada hâlâ kullanılırlar, özellikle de seslerin tekrar üretilmesinde tercih edilirler çünkü bazı insanlar onların bilhassa sıcak ve çekici bir ses üretiyor olduklarına inanırlar (ancak kör testler bunun bu konuda hevesli insanların sadece duymak istedikleri şeyleri duymalarına yol açan sessel bir plasebo etkisi olduğuna işaret etmektedir). Ancak valflere dayanan cihazlar sorunsuz değillerdi. Öncelikle, cam tüpler hassastı; kolayca zarar görüyorlardı, güvenle taşınmaları çok zordu. Ayrıca göreli olarak da bü-

yüklerdi; en küçükleri yaklaşık olarak bir başparmak büyüklüğündeydi ve bir ana akımı idare etmesi gereken diğerleri de bir elden daha büyüktüler. Dahası bir ısıtıcıya duyulan ihtiyaç, aynı bir ampul gibi zamanla enerjiyi tüketecekleri, bir süre sonra da yanacakları ve değiştirilmeleri gerekeceği anlamına geliyordu.

Elektronlarla bilgisayar çalıştırmak

Valfler kullanarak bilgisayar kadar karmaşık bir şey inşa etmek endüstriyel ölçekli bir işti. İkinci Dünya Savaşı esnasında Alman mesajlarının şifrelerini çözmeye yardımcı olan programlanabilir ilk bilgisayar olan Bletchley Park'taki Colossus'un ilk modeli 1.500 valfli ve ikinci modeli (Mark 2) 2.400 valfliydi. ABD gerçekten genel amaçlı olmak bakımından Colossus'un bir adım ötesinde olan ENIAC'ı ürettiğinde valf sayısı 17.000'e çıkmıştı. Bu devasa makinelerin bugünkü bilgisayarlarla hiçbir benzerlikleri yoktu, bu yüzden IBM'in başkanı Thomas Watson'ın dünya pazarında en fazla beş bilgisayarlık bir talep olacağını söylemesi tamamen aptalca değildi. Dünya pazarında çok sayıda ENIAC talebi hiçbir zaman oluşmayacaktı.

ENIAC yaklaşık 27 ton ağırlığında, 30 metre uzunluğundaydı ve 150 kilovat elektrik tüketiyordu. Bu elektrik gücünün büyük kısmı ısıya dönüşüyordu, yani bu canavar binanın sürekli soğutulmasını gerektirecek kadar ısı pompalıyordu (özel havalandırmalı bilgisayar odalarının ortaya çıkmasına bu aygıt yol açmıştır). Valflerin kaçınılmaz ve düzenli olarak arızalanmaları sebebiyle ENIAC hiç bozulmadan en fazla beş gün çalışabiliyordu ve arızalar arasındaki tipik süre ise iki gündü. Kötü huylu modern bilgisayarlar hakkında söylenip

durabiliriz, ancak ENIAC ile karşılaştırıldıklarında o kadar güvenilir cihazlardır ki gözlerimiz kamaşır.

Valf-bazlı bilgisayar başlangıçta askeriye ve üniversitelerde kullanılmak amacıyla, daha sonra ise iş dünyası için hatırı sayılır miktarda üretilmiş olsalar da günlük hayatta giderek artan elektronik uygulamaların kıyısında köşesinde kalmışlardı. Kısa süre içinde neredeyse her eve bir "telsiz" aygıtı girecekti. Biz bu aygıtı radyo adıyla tanıyoruz. O zamanlar radyonun düğmesini çevirdikten sonra bir süre onun "ısınmasını" beklemeniz gerekiyordu. Aygıta bu karakteristik özelliğini veren, yapımında kullanılan valflerdi. Ancak ENIAC'ın ilk kullanımından on yıl sonra, 1954 gibi erken bir tarihte hem ev elektroniğinde hem de bilgisayarda valflerin yerini transistörler almaya başladı.

Transistörlerin nasıl çalıştığına geri geleceğiz, ancak bir transistör katı bir materyal kullanarak bir elektrik akımı ile diğerini kontrol eder ve triyot valfiyle aynı işi görür. Isıtıcı (ve ısınma ihtiyacı), hassas cam kaplama, korunması gereken vakum yoktur. Ve transistörler eşdeğerleri olan valflerden çok daha küçük yapılabiliyorlardı; çoğu bir tırnaktan daha küçüktü. İlk transistör John Bardeen, William Shockley ve Walter Brattain tarafından icat edildi ve bu üçlüye bilimsel bir keşif yerine bir teknolojik keşifle alınması çok nadir olan Nobel Ödülü'nü kazandırdı.

İlk transistörlü bilgisayar 1953'te Manchester Üniversitesi'nde inşa edildi. Bu bilgisayarın 92 transistörü günümüzde her yıl üretilen 10^{19} (1'in yanına 19 sıfır koyacaksınız) transistörle karşılaştırıldığında solda sıfır kalır. Transistörlerin üretiminde pahalı el ile imalattan endüstriyel ölçekli ucuz seri imalata geçilmesiyle elektronik endüstrisinin dönüşümü başlamış oldu.

Entegrasyon kuralları

Modern elektroniğin dönüşümündeki son adım entegre devrelere geçişti. İlk radyolar, bilgisayarlar ve katı hal elektroniğine dayalı diğer elektronik aletler, baskılı devre tahtalarına lehimlenmiş transistörler, rezistörler ve kapasitörler gibi ayrı ayrı bileşenlerden oluşmaktaydı. Baskılı devre tahtası aslında bileşenler arasındaki bağlantıların plastiğin yüzeyinde bir metal filmden çizgiler haline getirildiği plastik bir levhaydı. Önce tamamen metal filmle kaplı bir tahta alınıyor ve devrenin şekli bu metal film üzerine işleniyordu. Sonra metal filmin devre şemasını içeren kısmı aside dirençli bir kimyasal ile boyanarak üzeri kapatılıyordu. Ardından da tahta aside daldırılıyor ve metal filmin, üzeri koruyucu kimyasal ile kapatılmamış kısımları eritiliyordu.

1960'larda bile elektronik eşyalar ve bilgisayarlar (o zamanlar hâlâ endüstriyel bir uygulamaydı), bağımsız bileşenlerinin büyüklüğü sebebiyle hâlâ bu devre tahtalarına bağımlıydılar. Radyolar gibi basit cihazlar, öncekine göre çok daha küçük olarak yapılabiliyor, elde taşınabiliyor veya bir arabanın gösterge paneline sığdırılabiliyordu. Ancak bilgisayarlar hâlâ binlerce transistör ve yüzlerce devre tahtası gerektiriyordu, bu yüzden oda büyüklüğünde kabinlerde tutulmaları gerekiyordu ve ciddi soğutma sistemlerine ihtiyaç duyuluyordu. 1960'ların merkezi işlem bilgisayarları ENIAC'dan daha küçük ve kesinlikle çok daha güçlüydüler belki ama henüz evlere girebilecek kadar ufalmamışlardı.

Bilgisayarların masa üzerinde bir kutu veya bir tablet, hatta bir akıllı telefon formunda (böyle telefonlar kendilerine eklenmiş olan, telefon aramaları için radyo ileticileri ve Bluetooth gibi özelliklerle gerçekten de güçlü birer bilgisayardır) cep bilgisayarı haline gelmiş olduğu günümüzde aşina olduğumuz elektronik aletleri üretmek için entegre devreleri kul-

lanmak gereklidir. 1950'lerin sonlarında tasarlanmış olan ve 1960'ların ortalarında pratik olarak kullanıma giren entegre devreler, bir elektronik akımın tüm bileşenlerini (transistörler, rezistörler vb.) tek bir silikon çipin yüzeyine yerleştirmiştir.

Ümitsiz bir iletken

Hem katı fazlı transistörler hem de bundan sonra gelen entegre devreler, aksi halde işe yaramaz bir madde gibi gözükebilecek bir şeyin esnekliğinin keşfedilmesiyle mümkün olmuştu. Pek çok materyal, ya elektriğin kolayca akıp geçtiği metaller gibi iletkenlerdir ya da elektriğin akışını tamamen engelleyen seramik gibi yalıtkanlardır ve her iki grup da elektrik devreleri için değerlidir. Ancak, genellikle ikinci bir girdinin etkisi altında sınırlı iletkenliğe izin veren, yarıiletkenler adında üçüncü bir sınıf daha vardır ve bu sınıf, katı hal elektroniğini mümkün kılacaktır.

Yarıiletkenlerin nasıl iş gördüğü, sıradan elektriğin aksine kuantum kuramı hakkında bir fikir sahibi olmadan anlaşılamayacak olan saf bir kuantum etkisidir. Valfler de kuantum araçlarıdır, ancak ne olup bittiğini bile anlamadan, su akışını kontrol etmek gibi basit bir model kullanılarak inşa edilebilir ve çalıştırılabilirler. Transistörlerin sisteme dahil olmasıyla, tasarlanması için kuantum fiziğinin anlaşılması gereken ilk teknolojinin ortaya çıkışını görmüş olduk. Elektronik aygıt bir melezdi; genellikle kuantum süreçlerini kullansa da klasik bir aygıt olarak (yanlış) anlaşılabiliyordu, fakat artık bilinen özelliklerini terk ediyor ve tamamen tuhaflaşıyordu.

Eğer iletkenlerdeki enerji bantları fikrine geri dönersek, bir yalıtkanda, elektronların kendi atomlarından ayrılmadığı "valens bantları" ile elektronların serbestçe dolaşabildiği iletken

kenlik bantları arasında büyük bir boşluk olduğunu görürüz (yaratıcı düşünülerek buna "bant boşluğu" ismi verilmiştir). Bu boşluk bir elektronun serbest kalmasının zor olduğu anlamına gelir. Bir yarıiletkende boşluk daha dardır, ancak dışardan bir müdahale olmadan madde hâlâ bir yalıtkan olarak iş görür. Bazı yarıiletken türlerine bu müdahaleyi ışık enerjisi yapar. Örneğin selenyum, üzerine ışık tutulduğunda elektriği daha iyi iletir. Ancak transistörler ve entegre devrelerde kullanılan yarıiletken türlerinin iletkenliğinin artırılması, yarıiletkenin saflığını azaltan katkılama maddelerinden ileri gelir.

Bir yarıiletkende elektrik akımı yüksek iletkenlik bantlarında aktığında valens bandındaki elektronlardan birkaçı da iletkenlik bandına çıkar. Elektronların davranışlarındaki karmaşık bir tuhaflık sebebiyle valens bandının tepesindekiler garip davranır ve "akıma karşı" hareket ederek iletkenlik bandındaki elektronlarla ters yönde hareket ederler ve elektronlarla birlikte boşlukları da taşırlar. Bu boşluklar "delikler" olarak bilinir ve bunlara başlı başına parçacıklarmış gibi davranılır. Net sonuç, iletkenlik bandında elektronların bir yönde hareket etmesi ve valens bandının tepesindeki deliklerin bunun aksi yönde hareket etmesidir. Bu sürece normalden çok daha küçük bir boşluğa sahip fazladan bir bant seviyesi sağlayan katkılama maddeleri yardımcı olur.

Katkılama, üzerinde oynanabilecek serbest elektron sayısını önemli bir şekilde artırır. Negatif için n ve pozitif için p olmak üzere iki çeşit katkılama maddesi mevcuttur. n-tipi bir katkılama maddesi olan bir atom, orijinal yarıiletkende mevcut olanla karşılaştırıldığında yedek bir elektron eklerken p-tipi bir maddede normale göre bir eksik elektron vardır. Bu, yarıiletkeni daha çok bir yalıtkan haline getirecek bir dezavantaj olarak görülebilir, ancak eksik elektron pozitif yüklü bir parçacığın etrafında dolanabileceği bir delik sağlar

(gerçekte elektronlar hâlâ hareket etmektedir, ancak görmüş olduğumuz gibi delik onlarla birlikte hareket eder ve hareket eden tek bir delik hareket eden pek çok elektrona eşdeğer olduğundan matematiksel olarak böyle kullanımı bazen daha kolaydır). Yani mesela modern elektronik için birincil yarıiletken olan silikon n-tipi bir yarıiletken yaratmak için fosforla veya p-tipi yaratmak için bor ile katkılanabilir.

Yarıiletkenden devreye

Dolambaçsız geleneksel bir transistör genellikle bir yarıiletkenin, bir triyot valfinin üç elektrotuna karşılık gelen üç bölümünün sandviç gibi dizilmesiyle inşa edilir; bu materyaller genellikle n, p, n şeklinde ya da p, n, p şeklinde katkılanmış materyaller olurlar. Sandviçin bir kenarına ve merkez parçasına gerilim uygulayarak ekstra bant seviyelerinin ayarlanması, uygulanan küçük voltajın bir valf gibi iş görerek elektronların sandviçin bir yanından diğer tarafına akışını kontrol ettiği anlamına gelir.

Dahili bir devrede MOSFET (metal oksit yarıiletken alan etkili transistör) olarak bilinen daha karmaşık bir ayarlama, silikon yonga plakasının üzerinde bir silikon dioksit (ayrıca silis olarak da bilinir, kum ve kuartzın temel bileşenidir) katmanının büyütülmesiyle veya polikristalin silikon olarak bilinen bir maddenin veya ince bir metal tabakasının üzerine püskürtülmesiyle üretilen temel transistörün genel eşleniği olup transistörün temel işlevini, çok daha küçültülmüş bir ayarlamayla olsa da üreten daha karmaşık bir katmanlı etki üretir.

Transistörler tek başlarına dahi değerlidirler, çünkü bir yandan diğer yana doğru çok daha büyük bir voltajı kontrol etmek için sandviçin merkez parçasına uygulanan değişen

miktarlardaki küçük bir voltaj, amplifikasyon üretir. Ancak bir bilgisayar için transistörler, mantık geçitleri adı verilen birimleri oluşturmak için bağlanır. Bunların neden gerekli olduklarını görmek için elektronikten bir adım geri çekilip Boole cebri ile Victoria çağı matematiğine girmemiz gerekmektedir.

Mantık sembolleri

Bu matematiksel tuhaflığın arkasındaki adam olan George Boole 1815 yılında Lincoln'de bir ayakkabı tamircisinin odasında dünyaya geldi. Babası bir ayakkabıcı olsa da matematik ve mühendisliğe ilgisi vardı ve genç George'a matematiğin temellerini şahsen öğretti. George sadece on altı yaşına kadar eğitim aldı ve hiç üniversiteye gitmedi; Doncaster'da doğrudan okul müdürü oldu ancak eğitimine okuyarak ve cebir konusunda kayda değer bir tecrübe edinerek devam etti. Boole kendi okulunu bir süreliğine idare ettikten sonra hayatının geri kalanında eğitim vereceği ve İrlanda'da bulunduğundan ötürü bazıları tarafından İrlandalı bir matematikçi olarak adlandırılacağı Cork'taki Queen's College'a atandı.

Boole bu makama getirildikten beş yıl sonra, kavramları sembollerle manipüle edebilen bir çeşit cebire dönüşecek matematiksel mantık kuramları üzerine bir kitap yayınladı. Yaklaşımı, birazdan göreceğimiz gibi bilgisayarların çalışma prensibinin özünü oluşturuyordu, ancak Google gibi bir arama motoruna belli bir kavram aratırken daha görünür bir seviyede de kullanmaktayız. Şöyle bir arama yaptığımı hayal edin:

(Arabalar VE kamyonlar) (kırmızı VEYA mavi) (Ford DEĞİL)

Büyük harflerle yazılmış olan kelimeler (Boole cebri için gelenekseldir) aramanın nasıl yürütüleceği konusunun anahtarıdır; arama motorunu kontrol ederler. "VE" bilgisayara her bir sonucun hem arabalara hem de kamyonlara işaret etmesi gerektiğini ifade eder. Sadece arabalar veya kamyonlar olması yeterli değildir, ikisi de mevcut olmalıdır. Orta bölüm "VEYA"yı kullanarak arama motoruna, sonuç kırmızı veya maviden birini içerdiği sürece kabul edilebilir olduğunu söyler; ikisini de içermesi mümkün olsa da gerekli değildir. Son bölüm de arama motoruna sonuçlarda Fordları istemediğimi söyler. Parantezler neyin ne olduğunu açık bir hale getirmek içindir. İlginç bir şekilde arama motorları orijinal olarak sıkı bir şekilde Boole'cu olsalar da Google artık Boole'cu kontrolleri kullanmıyor gibi gözükmektedir: bu aramayı Google görsellerde denediğimde sonuçların neredeyse yarısı Fordlardı. Muhtemelen reklam bütçeleri, Google'un "DEĞİL"i oldukça geniş bir şekilde yorumlamasına yol açıyor.

Bay Boole'un kapıları

Basit mantıksal talimatların kombinasyonları, bilgisayarın hiç şahit olmadığımız çalışma şekli için gerekli olan tüm operasyonları kurmak için gereklidir. Buralarda bu kontrollere "kapı" adı verilir. Yani, örneğin bir VE kapısı iki girdiyi alır, her iki girdi de 1 ise 1'i geri çevirirken (bu bir elektrik akımıyla temsil edilir), diğer tüm durumlarda 0'ı geri çevirir (akım yok). Boole'cu mantığı kullanan VE kapısı, sadece her iki girdi de bir değere sahipse bir değeri geri çevirir. Buna karşın bir VEYA kapısı girdilerinden herhangi biri bir değere sahipse 1'i geri çevirir. Ve DEĞİL kapısı tek bir girdiyi tersine çevirir, 1'i 0 ve 0'ı 1 yapar. Ayrıca bir VE kapısının çıktısının tersini üreten VEDEĞİL gibi bileşik kapılar da mevcuttur.

Eğer bu kapıları elektronik olarak üretme imkânınız varsa, bir bilgisayarın ana işlevlerinin tümünü sağlayacak şekilde onları bir araya getirebilirsiniz ve transistörler de (veya valfler de) aynen bunu yaparlar. Eğer iki transistörü birbirine seri bağlarsanız sonuç bir VE kapısıdır, çünkü akım ancak transistörlerin ikisi de akım geçişi için "açıksa" geçecektir. Eğer ikisinden biri kapatılırsa bu 0'ı temsil eder ve tüm yapıdan hiç akım geçmez; çıktı olarak 0 meydana gelir. Ancak her iki transistörü de 1'e ayarlayarak 1 VE 1 yaparsınız ve 1 çıktısını alırsınız. Benzer şekilde bir VEYA kapısı da iki transistörü birbirine paralel şekilde bağlayarak üretilebilir, yani ikisinden herhangi biri akımın geçmesine izin verecek şekilde açıksa (yani 1'e ayarlanmışsa) akım kapıdan geçecek ve 1 çıktısını üretecektir.

Elektroniğin temel yapıtaşları legolar gibi büyük bir esneklikle bir araya getirilebilir ve bir ses amplifikatöründen bir bilgisayara kadar her şey üretilebilir. Ben küçükken transistör ve rezistörler gibi gerçek bileşenleri delikli bir tahta üzerinde bir devre oluşturacak şekilde bir araya getirerek genç bilim insanlarına bunu yapma olanağı veren popüler oyuncak setleri mevcuttu. Ancak şimdiye kadar üretmiş olduğumuz her aracın nasıl çalıştığının altını doldurmak için kuantum çevresinde yapılacak daha çok iş vardır. Teknolojinin özellikle üç parçası dikkatimizi çeker: bellek, ekran ve dijital kamera.

Zayıf bir bellek

En eski günlerinden beri bilgisayarlar iki çeşit depolamaya ihtiyaç duymuşlardır: Bu mantık kapılarının yönlendirdiği bilgileri tutacak bir bellek yani kısa süreli depolama ve uzun süreli depolama. Geleneksel elektronik araçlar çalışma belle-

ğinin kısa süreli kullanımı için uygundular, ancak valfler ve daha sonra da transistörler ile uzun süreli depolama yapmakta sıkıntı yaşanıyordu çünkü güç kesildiğinde bellek siliniyor ve bilgiler kayboluyordu. İlk bilgisayarlar genellikle kâğıt şeritler veya kartlar üzerine bir dizi delik açılarak kaydedilen bilgiye güvenmekteydi, ancak dijital bilgisayarın ömrünün büyük kısmında uzun süreli depolamanın en yaygın kullanılan biçimi manyetik depolama olmuştur; hâlâ büyük ölçüde bu yönteme güvenilmektedir. Bu yöntemin özü bilginin metalik yüzey üzerinde bir dizi manyetik bölgecik oluşturularak (küçük manyetik materyal parçaları yönlendirilerek) saklanmasıdır. Bu saklama ya da kaydetme işlemi için önceleri metalik tamburlar veya şeritler kullanılırken bugün artık hızlı dönen disklerden yararlanılmaktadır.

1990'lar yeni bir depolama yönteminin yaygınlaşmasına şahit oldu: optik depolama. Bu iş için CD vb. ortamlar kullanılmaya başlandı. Ancak bu teknolojinin ömrü, bilgisayarların gelişim süreci düşünüldüğünde şaşırtıcı şekilde kısa oldu. Artık uzun süreli depolama genellikle taşınabilir bellekler kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknoloji diskin hassasiyetinden ileri gelen dezavantaja sahip olmadığı gibi bilgisayar belleğinin okuma ve yazma hızıyla çalışma avantajına sahiptir; tüm disk türleri kaçınılmaz olarak yavaştır. Benim gibi, bir hard diski olan bir bilgisayarı düşürmüş olan herkes bunun iyi bir hareket olmadığını bilir. Taşınabilir bellek katı halde olduğundan mekanik bir araçtan çok daha küçük yapılabilir ve onlarca gigabayt, tırnak büyüklüğünde bir çipe sıkıştırılabilir.

Elektronikte alışılmış olduğu üzere, delikli kâğıt ve kartondan beri tüm depolama yöntemleri doğaları gereği kuantum fiziğine dayalı oldu, ancak valflerden katı hal elektroniğine geçişte kuantum mekanizmasının daha aşikâr olması gibi

manyetize yüzeylerden taşınabilir belleğe geçiş de kuantum fenomenlerini operasyonun merkezine yerleştirdi. Taşınabilir bellek 1980'lerin başlarında Japon firması Toshiba tarafından icat edildi. Önceleri saklı tutulan bu teknoloji bilgisayarların açılış aşamasında devreye giren BIOS talimatları gibi nadiren değişen bilgilerin saklanması için kullanıldı. Böylece kullanıcılar bu teknolojiye sadece dolaylı yoldan erişebiliyorlardı. Bunun sebebi, ilk taşınabilir belleklerin pahalı olması, okuma ve yazmada yavaş olması ve bu sebeple de günlük seri kullanım için uygun olmamasıdır.

Yeni nesil taşınabilir bellek çiplerinin öncüleri 1990'larda kullanıma hafıza kartları olarak girdi. Günümüzde, telefonlarımız ve taşınabilir bilgisayarlarımızda gigabaytlarca bilgiyi güvenle saklamamızı sağlayacak küçük ve hızlı depolama araçları olarak iş görmektedirler. Taşınabilir belleğin bu türü, önceki versiyonuna göre çok daha hızlıdır. Bir kısıtlaması mevcuttur (belirli bir zamanda tek bir konuma erişip yüzlerce veya binlerce biti eşzamanlı olarak okuyamaz veya yazamaz) ancak bunun üstesinden kolayca gelinmiştir, zaman zaman kullanışlıdır ve erişim hızı her zaman daha önemli olmuştur.

Diğer geleneksel depolama araçları gibi taşınabilir bellek de transistörler kulanır, ancak bunlar MOSFET cihazlarının özel (*bkz.* sayfa 68) türleri olup yüzen kapı transistörleri olarak adlandırılır. Kapı, triyottaki ızgaranın transistördeki karşılığı olup valf boyunca akımı kontrol eden elektrottur. Bir yüzen kapı transistöründe iki kapı mevcuttur: Geleneksel bir "kontrol" kapısı ve onun altında elektrik gücüyle izole edilmiş olan ve bu şekilde bir yükü süresiz bir şekilde tutarak veri depolanmasını sağlayan bir yüzen kapı mevcuttur. Yüzen kapı elektrik yükü ile yüklendiğinde kontrol kapılarının transistörden geçen akımı etkilemesini engelleyerek ona kalıcı bir anahtar rolü verir.

Yüzen kapı yalıtkanlarla tamamen izole edilmiş olup indüksiyon ile bir perde olarak iş görür. Tek sorun, kapıdaki elektrik yükünü yüklemeden veya silmeden bu erişilmez hafızadaki değerin nasıl değiştirileceğidir. Elektrik yükü kapıya kuantum tünellemesi ile eklenir veya kapıdan silinir (*bkz.* sayfa 40). Hatırlayacağınız gibi, kuantum tünellemesi bir parçacığın (bu durumda bir elektronun) bir bariyerin bir tarafından diğer tarafına, aradaki boşluğu kullanmadan geçtiği süreçtir. Bu tuhaf kuantum etkisinden bariz bir şekilde faydalanmadan böyle bir yüzen kapı transistörü işlev göremez. Depolama için taşınabilir bellek kullanan tüm cihazların içinde bir miktar tünelleme mevcuttur.

Verileri görmek

Bilgisayarlardan gelen veriler dünyaya, uzun bir süre boyunca önce delikli bantlar ve kartlar, daha sonra da uzak yazıcılar olarak bilinen otomatik daktiloların çıktısı olarak sunulmuştu, ancak görsel bilginin çıktısını almak için, geçmişi Victoria çağına kadar uzanan ve bilgisayarlar ile televizyonlar için standart haline gelecek bir teknoloji zaten mevcuttu: katot ışın tüpü. Görmüş olduğumuz gibi ilk önce boşaltılmış bir cam tüpün bir ucunun parlamasına sebep olduklarında keşfedilen katot ışınları aslında elektron akışıydı. İlk deney çok geçmeden iki özgün yol izlenerek geliştirildi.

Orijinal "Crookes" tüpünden ileri doğru atılan ilk adım, tüpün dibindeki camı fosforla kaplamak olmuştu. Camın kendisi, bir elektron akımına maruz bırakıldığında hafifçe fosforlu hale gelir, bu yüzden Crookes ve diğer deneyciler orijinal hayaletimsi yeşil parıltıyı, fosfor çok daha parlak ışık verdiğinden daha parlak görmüşlerdi. Fosfora ulaşan elektronlar, materyalin mikroskobik ölçekte kafesi andıran iskele-

tine çarparlar. Kinetik enerjinin bir bölümü fosfor atomlarının yörüngesinde dolanan elektronlar tarafından emilir; enerjiyi alan elektronlar Valens bandından daha yüksek seviyedeki iletim bandına sürüklenir ve orada aktivatör denilen özel katışkılara erişene dek kafesin gözenekleri arasından süzülürler. Aktivatör tarafından yakalanan elektron daha alt seviyeye düşer ve küçük bir ışık parlaması şeklinde enerji verir.

Bir çinko kadmiyum sülfür ve çinko sülfür gümüş karışımı kullanılan ilk ekranlar siyah beyazdı, ancak renkli ekranlarda, ana renk ışıklarını oluşturan mavi, yeşil ve kırmızı bölgelerde zirveye çıkan üç fosfor noktası vardır. (Hâlâ ilkokullarda öğretiliyor olduğu gibi ana renklerin kırmızı, mavi ve sarı olduğuna inanıyorsanız, yanılıyorsunuz. Bunlar ara renkler olan macenta, camgöbeği ve sarının basitleştirilmiş halleridir. Bu hakiki ana renklerin "karşıtları" pigmentler kullanılırken anahtar rolü oynar ve bunlar size, ışık yerine muhtemelen boya kullanılarak işleri basitleştirmek için anlatılmıştır.)

Bir katot ışını ekranından gelen parıltı, doğru fosforlarla parlak ve renk açısından iyi kontrol edilmiş olabilir, ancak geleneksel bir Crookes tüpü mekanizması, sadece tüpün dibini aydınlatır (anodun yarattığı gölge bunun dışında kalır). Bir katot ışın tüpünü bir televizyon veya bilgisayar ekranına dönüştürmekte, fosfor yüzeyinde bir görüntü oluşturmak için yüzey boyunca ilerleyen bir elektron ışınını kontrol etmek de gereklidir.

Bir bilgisayar ekranında yazı veya bir televizyonda resim olan görüntü, ekranın yüzeyi boyunca hızlıca süpürülerek ve fosforun ışın geri geldiğinde hâlâ aktif olabilecek kadar uzun bir süre parlayacağına güvenilerek oluşturulur. Işının yönü, elektronların akışını gerekliliğe göre yönelten, elektrik yüklü plaka çiftleri ile kontrol edilir. Elbette ki elektronlar, ekranın

parlaması gereken yerlerine sadece parça parça ateşlenir. Aralarda siyah yerler kalması için boşluklar bırakılır. (Daha kesin konuşmak gerekirse gri yerler bırakmak için. Bir televizyon, ekranın cihaz kapalıyken aldığı renkten daha koyu bir renk gösteremez, ancak bizi aldatmakta tecrübeli olan beynimiz, gerekli olduğunda, mesela bir uzay sahnesinde, bunu kömür karasına çevirir.)

Hakikaten kaba olan Victoria çağı katot ışın tüpü teknolojisi, televizyonun ilk günlerinden 1990'lara kadar görüntüler ve metinlere nasıl baktığımızı belirledi. Ancak bundan sonra diğer görüntüleme türleri öne çıkmaya başladı. Katot ışın tüplerinin sorunu (çalıştırılmaları için tehlikeli derecede yüksek gerilim gerektirmelerinin yanı sıra) büyük, hantal ve ağır olmalarıydı. Elektron ışınının tüm ekranı süpürebilmesi için elektronları üreten "tabancanın" cihazın ön kısmından yeteri derecede uzak olması gerektiğinden tüplerin, genişliklerinin en az yarısı kadar da derin olmaları gerekliydi. Sadece kırk elli santim genişliğinde olan en eski ekranlarda bu büyük bir sorun değildi, ancak görüntü giderek daha büyük bir hal aldığında tüpün derinliği ciddi bir utanç kaynağı haline geldi.

Zarif görüntüler

Derken, düz ekran ortaya çıktı. Düz ekranlar üç teknolojiye dayanırlar. En eskisi ve muhtemelen hâlâ en popüler olanı LCD yani sıvı kristal görüntülemedir. Bu teknoloji, katot ışını tüpünün oluşturduğu kamburu sırtından atmakla kalmadı; hem görüntü oluşturmak için çok daha az enerji gerektiriyor hem de ekranın daha da büyütülmesine olanak tanıyordu. Eski televizyonlar ve monitörler, fosforun oluşturduğu ışığı kontrol ederek görüntü oluştururken, LCD tüm ekran boyunca eşzamanlı bir aydınlatma yaratır ve izleyiciye ne kadar ışık

ulaşacağını bir çeşit filtre kullanarak kontrol eder. Bu işin sırrı, sıvı kristalin işlev görmesinde gizlidir.

Sıvı gibi akabilen ancak katı bir kristalin bazı özelliklerini gösteren tuhaf bir madde olan sıvı kristaller ilk olarak 1888'de keşfedildi. Ekranlarda kullanılan özel sıvı kristallerin akıllıca bir numarası daha vardır. Doğal hallerinde içlerinden geçen ışığı dönüştürürler. Işığın, ışık dalgası bir kenardan diğer kenara ilerlerken seyahat yönüyle karşılaştırıldığında yönü olarak düşünülebilecek, polarizasyon adlı bir özelliği mevcuttur. (Eğer ışığı fotonlar olarak görmeyi tercih ediyorsanız [bir sonraki bölüme bakınız] bu, hareket yönüne dik açılarda belirli bir yönü olan bir fotonun özelliğidir.) Işık sıvı kristalden geçerken polarizasyon yönü değişir.

Bir LCD ekranda, büyük bir kristal şeridi, sadece belirli bir yönde polarize olan ışığın geçmesine izin veren eleklere benzeyen, polarize iki filtre arasına yerleştirilmiştir. Filtreler birbirleri ile dik açıda kesişmektedirler. Yani, sözgelimi eğer arka filtre yatay olarak çalışıyorsa, sadece yatay olarak polarize olan ışık geçer. Bu ışık daha sonra, sadece dikey olarak polarize olan ışığın geçmesine izin veren ön filtreye vurur. Yani yatay olarak polarize olan ışığı arka filtreden engellemiş olur. Sonuçta bu filtrelerden hiçbir şey geçmez. Karanlık bir ekran oluşur. Ancak sıvı kristali araya koyarsanız polarizasyonu çevirir ve yatay olarak polarize olan ışık, dikey ışığa dönüşür. Bunun anlamı, yatay filtrenin arkasında aydınlanmış olan panelden gelen ışığın ekranın önünde parlamasıdır.

Bu ana kadar sorun yok. Ancak işler burada (kelimenin tam anlamıyla) tersine döner. Sıvı kristalden bir elektrik akımı geçirildiğinde, spiral halindeki molekülleri düzleşir. Bu yeni düzenlemede sıvı kristal, ışığın polarizasyonunu artık döndürmez. Ve ekran kararır. Akım verildiğinde kararır, akım kapatıldığında aydınlanır. Eğer bu kadar basit olsaydı,

bir ekran sadece Mors kodunu üretebilirdi, ancak uygulamada bir görüntü, her biri kontrol edildiği bir çeşit elektrik akımına bağlı olan binlerce küçük parçaya bölünmüştür. Renkli ekranlarda bu parçalar veya piksellerin her biri ana renklere karşılık gelecek şekilde üçe bölünmüştür. Akım, belirli bir parçaya hitap edilmesine ve kristalin sadece bir kısmının rotasyon etkisiyle açılıp kapanmasına olanak verir. Sonuç olarak, ekran, her bir parçanın veya pikselin ("resim elementinin" karmaşık bir versiyonu) nasıl açılıp kapandığına bağlı olarak karmaşık bir resim oluşturabilir.

Bu, bir ekranın artık rengârenk bir görüntüyü gösterebileceği anlamına gelir. Bu kitabı yazarken kullandığım bilgisayarın 2.550 x 1.440 piksellik bir ekranı var. Bu ekran 3.672.000 parçadan oluşuyor ve böylece gerçek bir görüntüden ayırt edilmesi çok güç olan ayrıntılı bir resim yaratıyor. Artık rekabet halinde pek çok teknoloji bulunsa da her biri, tipik olarak ekranda gözüken görüntüyü idare etmek için her bir piksele uygulanan akımı kontrol eden ayrı bir transistör ile geniş anlamda bu teknolojiden faydalanan bir çeşit sıvı kristal teknolojisine dayanıyor.

Maddenin dördüncü haline bakmak

LCD'nin daha popüler olan bir alternatifi, gerçekten çok büyük LCD görüntülerinin üretilmesinden önce mümkün olagelen plazma ekrandır. Bunlar LCD gibi gözükseler de genellikle çok daha parlaktırlar. Bu parlaklığa, LCD ile karşılaştırıldığında büyük oranda daha yüksek güç tüketimi ve daha kısa ömür ile ulaşılır. Bir plazma ekranı aslında, küçük floresan ampullerden oluşan devasa bir matris gibidir. Ekranın yüzeyindeki her bir küçük hücre neon gibi bir soygaz ve az miktarda cıva içerir. Cıva bir elektrik akımı ile buharlaş-

tırılarak, bir iyon (elektron eksiği veya fazlası olan atomlar) bileşimi olan plazma oluşturulur. Gazların aksine plazma çok iletkendir. Elektronlar plazma boyunca hareket ederek cıva atomlarına bağlı olan elektronları uyarırlar, daha sonra bu elektronlar eski hallerine dönerek morötesi ışık yayarlar. Işığın yüksek enerjili olan bu hali bir fosfora çarptığında fosforun görünür ışıkta parlamasına olanak vererek görüntü yaratır.

Plazma görüntülerine rağbet bugünlerde azalmış gibidir, ancak LCD'lerin karşısında onlarla rekabet eden LED ekranlar da mevcuttur. Bunlarda, her biri bir toplu iğne başından daha küçük olan, ışık yayan minik diyotlardan (isim buradan gelir) oluşan pikseller mevcuttur. Bu diyotlar, elektronların deliklere hücum ederek ışık saçtıkları bir yarıiletkendeki kuantum etkisinden yararlanırlar. LED panelleri hakkındaki en etkileyici şey, inşa edilmeleri için bir boyut sınırının bulunmamasıdır; dış mekanlarda yapılacak gösterimler için 40 metre kadar büyük olanları vardır. Televizyonlar ve bilgisayar ekranları için, ışık yayan tabaka olarak organik bir bileşik kullanan OLED'ler (organic ışık yayıcı diyotlar) en yaygın LED türüdür. LED'ler, LCD'lere göre daha ince, daha hafif ekranlar üretmek için kullanılabildiklerinden ve daha yüksek kontrast oranı sağlayabildiklerinden ötürü giderek daha popüler hale gelmektedirler.

Kuantum şipşakları

1990'lardan beri tamamen değişmiş olan bir başka teknoloji ise fotoğraf çekmekte kullanılan teknolojidir. Bu değişimi en iyi anlatan olaylardan biri, eskiden dünyanın en meşhur markalarından biri olan Eastman Kodak'ın, ürettiği filmlere olan talebin tamamen ortadan kalkmasından ötürü 2012 yılında

iflas etmesidir. 20. yüzyıl boyunca kullanılmış olan filmli makineler, Victoria çağından buyana yavaş yavaş değişti, ancak kuantum kuramı, elektroniği kullanıp fotoğraf çekerek geleneksel fotoğrafçılık teknolojisini altüst etti.

Dijital fotoğraf makinesi, fotoğrafı sarf malzemesi kullanmadan çektiği için iş modelini dönüştürerek fotoğrafçılıkta devrim yarattı. 1975'te dijital fotoğraf makinesini icat edenin de Kodak olması ironiktir. Şirket, önceleri, kendi asıl iş sahası olan film imalatını olumsuz yönde etkileyeceğini görerek, dijital fotoğraf makinesini geliştirme yoluna gitmedi. Bu, Victoria çağında elektrik ışığıyla karşılaştıklarında, rekabet edebilmek için en iyi yöntemin daha iyi bir gaz başlığı geliştirmek olduğunu düşünen gazlı aydınlatma şirketlerinin tepkisi kadar dar görüşlü bir tepki olmuştu. Kodak, geleneksel duruşu sonrasında ağır bir bedel ödedi. Dijitale geçilmesinin sonucu olarak, alışık olduğumuzdan çok daha fazla resim çekmeye başladık ve çok amaçlı cep telefonuna dahil edilen kameralar sayesinde artık çoğumuz yanımızda bir fotoğraf makinesi taşıyoruz.

Dijital bir fotoğraf makinesine giren ışık, tipik olarak renkli minik filtrelerden oluşan bir mozaikten geçer, çünkü ışığı tespit etmek için kullanılan sensörler, renkleri ayırt etmezler. Sensörler için olası iki mekanizma mevcuttur. 1975'teki ilk kamerada kullanılan ve hâlâ oldukça yaygın olan en eski teknoloji, yük bağlaşımlı devredir (CCD). Bu teknoloji her biri elektronları tutabilen minik kaplar dizisinden oluşmaktadır. Fotonlar cihazın bir bölgesine çarparak elektronları serbest bıraktıklarında hücrenin içerisindeki elektron sayısı artar ve bir hücre ışığa ne kadar çok maruz bırakılırsa, içerisinde o kadar çok elektron birikir. Fotoğraf çekildiğinde, bir resme dönüştürülecek veriyi üretmek üzere her bir hücredeki gerilim ölçülür.

CCD'lere alternatif bir yaklaşım, bir "tamamlayıcı metal oksit yarıiletken" (CMOS) sensörüdür. CMOS sensörü pratikte, zamanla bir resim oluşturmanın aksine, gelen ışığa doğrudan tepki veren ışığa karşı hassas bir dizi diyot ve amplifikatörden oluşan entegre bir devredir. CMOS sensörleri, CCD'lere göre daha hızlı çalıştıklarından ve daha ucuza üretilmiş olduklarından ötürü makinelerin çoğunda pazarı ele geçirme eğilimindedirler. Ancak CMOS sensörleri, yüksek hızla hareket etmekte olan nesnelerin görüntüsü alınırken tuhaf görsel etkilerle sonuçlanacak şekilde tek bir görüntüyü yukarıdan aşağıya sıra sıra algılarken CCD'ler, tüm resmi çektiklerinden, yüksek kaliteli video kayıt cihazları gibi bazı uygulamalarda hâlâ kullanılmaktadırlar.

Her yerde var olan etkileşim

Bu kuantum teknolojileri artık her tarafımızdadır. Çoğunlukla bunları oldukları gibi kabul ederiz. Bir televizyonu veya bir radyosu, bir bilgisayarı veya bir telefonu bulunmayan pek az ev mevcuttur. Mütevazı çamaşır makinemizin bile bir bilgisayar programı ve bir ekranı olduğunu görürüz. Faraday, hükümetin bir gün icadını vergilendireceğini söylerken haklı olmakla kalmamıştı, ayrıca elektriği üretme ve kullanmadaki ilk adımlar, günlük yaşantımızın dönüşmesinin ilk adımları olmuşlardı.

Elektrik, elbette biz kendisine dayanan teknolojiyi geliştirmeden uzun zaman önce de mevcuttu. Yaşayan tüm varlıkların dahili sistemlerinde bir elektrik bileşeni mevcuttur. Elektrik doğada serbest halde de bulunur; doğada bulunan elektriğin en etkileyici şekli yıldırımdır. Ancak doğada çok daha belirgin olan ve bazı açılardan elektrik etkisinden daha da takdire şayan olan başka bir kuantum etkisi de mevcuttur.

Bu kuantum mucizesi, Güneş sayesinde görmemizi sağlar ve Dünya'yı yaşanabilir bir yer haline getirir. Elektrik yüklü parçacıklar arasındaki çekme ve itmenin bile en önemli kısmını oluşturur. Bu itme ve çekme kuvveti katı maddenin yapısı ile tüm mekaniği oluşturur ve bir sandalyenin içinden geçerek yere düşeceğimize üzerine oturmamızı sağlar.

Bu mucize, ışık ile madde arasındaki etkileşimdir.

BÖLÜM 4

KED

Pratikte tecrübe ediyor olduğumuz her şey ışık, madde veya her ikisinin birden sonucudur. Işık daha çok, görebilmemizi sağlayan bir fenomendir. Gezegenimizi yaşanabilir derecede sıcak tutacak olan enerjiyi taşıyarak uzay boşluğunu aşıp Güneş'ten Dünya'ya ulaşan şey ışıktır. Farklı ışık frekansları mikrodalga fırınlarımızda yemek pişirmemizi, radyomuzu dinlememizi, televizyonumuzu izlememizi ve cep telefonuyla iletişim kurmamızı sağlar ve doktorların X-ışını ve CAT taramaları yapmalarına olanak tanır. Ve kuantum seviyesinde, ışık fotonları, bir şeye dokunabilmekten, zeminin içinden geçerek kaybolmamaya kadar doğrudan yaşadığımız fiziksel deneyimlerin çoğunluğundan sorumlu olan elektromanyetik kuvvetin taşıyıcılarıdır.

Gözlerdeki ateş

Işık insanları büyüler. En azından, bizi düşündüren ve şaşırtan şeyler hakkında yazıp çizmeye başladığımızdan beri bizi büyülediğini biliyoruz. Şüphesiz bu hayranlığın geçmişi daha da eskiye dayanır. Işık ezelden beri gizemli ve mucizevi bir fenomen olarak görülmüş olmalıdır. Işık ilk olarak kaçınıl-

maz bir şekilde görme ile ilişkilendirilmiştir. Eski Yunanlar, görmenin, kafanın içerisinde, gözden görülen cisme bir ışın uzatan özel bir ateş ile mümkün olduğunu düşünüyorlardı. (Bu ateşin bizi yakmaması için içimizde su odacıkları bulunduğu düşünülmekteydi.) Bir şeyi görebilmek için harici bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulmadığından bu, çılgınca bir fikir gibi algılanabilir. Yunanlılar bu sorunu, Güneş'in görmede bir rol oynadığını, ancak sadece gözden gelen ışınları hızlandırdığını söyleyerek aşmışlardı.

Bu fikrin tuhaf gözükmesinin sebebi, felsefi yapıları, gözlemlenen dünyanın üzerinde tutmasıdır. Çevremizi saran dünya içerisinde meydana gelen görme eyleminin faili biz olduğumuzdan Yunanları bunun tamamen harici bir kaynaktan doğduğuna inandırmak imkansızdı. Bizim zaten orada bulunmakta olan ışığın sadece pasif reseptörleri olduğumuzu kabul etmeye istekli değillerdi. Matematikçi Öklid, çağdaşı eski Yunanların ışığı ne denli farklı anladıklarına dair iyi bir örnek verir. Yerdeki bir iğneye bakarken Güneş'ten gelmekte olan ışığın her zaman iğnenin üzerine düştüğüne işaret eder. Ancak bunu görmemiz gerekli değildir. Ama gözden gelen görme "ışığı" üzerine geldiğinde iğne görüş alanımıza girer. Eski Yunanlar Güneş'in görmeyi hızlandırdığına ama gözden çıkan ışınların görmeyi sağladığına inanıyorlardı.

Ortaçağ geldiğinde Arap ve Avrupalı düşünürler, bu sıkıcı Yunan mantığını bir kenara bırakarak ışığın, Güneş gibi bir kaynaktan gelen, suyun çeşmeden fışkırması gibi bir nesneden yansıyan ve gözlerimize gelerek onu görmemizi sağlayan bir çeşit akım olduğunu anlamışlardı. Ay'ın kendi ışığıyla parlamadığını, Güneş'in daha baskın olan ışığını yansıttığını fark etmişlerdi. Işığın bir yerden başka bir yere düz çizgiler halinde aktığı görüşü, bu akışı manipüle etmemize yardımcı olan teknolojinin geliştirilmesiyle daha da karmaşık ve ay-

rıntılı hale geldi. En eski optik teknoloji, ışığı alelade bir nesneden daha yoğun bir şekilde yansıtacak aynalar, cilalanmış metal ve taşlar olmuştu; ancak merceğin geliştirilmesiyle ışık, evrenin keşfedilmesi için daha kullanışlı bir araca dönüştü.

Mercek (lens) kelimesi mercimek sözcüğünün Latincesinden gelmekte olup konveks bir merceğin mercimeğin şekline benzerliğini vurgulamaktadır. Eğer ışık doğru çizgiler halinde yol alan bir şey ise mercekler (bu "bir şey"in ne olduğuna fazla kafa yormadan) bu akışı kırmak, ışığı manipüle etmek, çıktıyı yoğunlaştırıp büyütmek için kullanılabilirdi. Çok kısa süre içinde mercek çıplak gözle ayırt edilemeyen çok küçük cisimleri veya Dünya'nın haricinde göklerde uzaklarda yer alan şeyleri incelemeyi olası kılmıştı. Işık, insanın ihtiyaçları için kullanılarak gitgide daha kullanışlı bir fenomen halini almıştı ancak ışığın ne olduğunun anlaşılması hakkında çok az ilerleme kaydedilmişti.

Mekanik ışık

Fransız filozof René Descartes 1664'te ışığın nasıl hareket ettiği hakkında ilk mantıklı bilimsel açıklamayı yapan bilginlerden biri olmuştu, ancak argümanına karşı çıkmak çok kolaydı. Uzayın tamamının plenum adını verdiği soyut bir cisimle dolu olduğuna inanıyordu. (Descartes'ın kuramı insanı doğruluğundan şüphe duymaya itecek kadar tuhaf gözükse de, bilim insanları, ışığın hareketini açıklamak için kısa süre sonra kullanılmaya başlanacak olan aydınlatıcı eter fikrini ya da günümüzde gerçekliğin doğasını modellemek için kullanılan çağdaş kuantum alan kuramını ortaya atarak, zaman zaman bu filozofunkine benzer kavramlara dönüş yaptılar.)

Descartes bir şeyin ışık verdiğinde plenum içerisinde bir çeşit basınca sebep olduğunu hayal etmişti (buna "hareket

etme eğilimi" adını veriyordu). Örneğin gece gökyüzüne bakıp parlayan bir yıldız gördüğümüzde, yıldızı gözümüze bağlayan inanılmaz derecede uzun çubuk gibi bir şey var olmalıydı. Yıldız çubuğun bir ucundan baskı uygulamaktaydı; çubuğun diğer ucu göze baskı uygulayarak görüntü etkisini oluşturmaktaydı. Bu model, yüzyıllar boyunca tartışma konusu olacak şekilde ışığın sonsuz hızda hareket ettiğini vurgulamaktaydı. Descartes ışığın çok hızlı olduğunun farkındaydı.

Galileo da ışığın hızını ölçmeye çalışmıştı. Eline bir fener aldı. Uşağını çağırdı, onun eline de bir fener verdi ve karşı tepeye gitmesini, kendisi elindeki feneri yaktığı zaman onun da kendi elindeki feneri yakması söyledi. Uşağı karşıki tepeye ulaşınca Galileo kendi fenerini yakması ile uşağının cevaben kendi fenerini yakması (aslında Galileo'nun uşağının fenerini yaktığını görmesi) arasında geçen süreyi ölçtü. Uşağını yanına çağırdı ve aynı işaretleşmeyi aralarında çok az bir mesafe varken tekrarladıklarında geçen süreyi ölçüp önceki ölçümle karşılaştırdı. İki ölçüm de aynı sonucu veriyordu. Tespit edebildikleri tek gecikme, tepki sürelerinden kaynaklanmaktaydı. Ancak ışığın hızının sonsuz mu yoksa sadece çok yüksek mi olduğunu tespit etmek, o zamanın deneylerinde kullanılan araçlarla üstesinden gelinecek iş değildi.

Işık hakkında çarpıcı keşifler yapan ve Descartes'ın kuramını kulağa daha pratik gelen başka bir kuramla değiştiren kişi, Descartes'tan yaklaşık 50 yıl sonra doğan Isaac Newton oldu. Ancak Newton'un kendi fikirleri de tartışma konusuydu ve 200 yıldan uzun bir süre boyunca, sonunda gerçeğe herhangi birinin hayal ettiğinden bile daha yakın olduğu ortaya çıkana kadar rafa kaldırılacaktı. Newton ışığın "korpüskül" adını verdiği parçacıkların akışı olduğunu düşünmekteydi. Bunun anlamı ışığın uzayda görünmez bir plenuma veya

etere ihtiyaç duymadan seyahat edebilmesi olup Newton'un modelini, karşıt kuramların çoğuyla karşılaştırıldığında hoşa gidecek şekilde basitleştirmesiydi. Newton'a göre ışık, sonsuz hızda seyahat etmiyorsa da çok hızlı olmalıydı.

Gökkuşağını çözmek

Newton bu hızı ölçmeye çalışmadı, ancak ışık ve renkleri anlamamıza zemin hazırlayan bir dizi deney yürüttü. 1664 yılında 22 yaşında Cambridge'deyken bir fuarı ziyaret etti ve oldukça eğitici olduğu ortaya çıkan bir oyuncak satın aldı. O zamanlarda üniversitenin özel polis gücü olan gözetmenler, üniversite üyelerini kontrol altında (ve şehrin meyhanelerinden uzak) tutmaya çalışıyordu. Stourbridge Fuarı gözetmenlerin yetki alanının dışında kalıyordu ve yılda bir kez kurulan bu fuar akademisyenlere kendilerini salıp biraz eğlenme fırsatı sunuyordu. Newton'un bu fuarda oyuncak ve ıvır zıvır satan bir dükkândan satın aldığı oyuncak, camdan yapılmış bir üçgen prizmaydı.

Prizmanın oyuncak olarak satılmasının sebebi, içinden ışık geçirildiğinde hoş bir gökkuşağı deseni üretmesiydi. Cam üçgen prizmanın bu özelliği uzun zamandan beri biliniyordu. Newton neler olup bittiğini keşfetmeye kararlıydı. Zamanın en popüler kuramı, camın içindeki kusurların, içinden geçen ışığı renklendirmesiydi; o zamanlarda cam kalitesi çok düşük olduğundan bu teori oldukça olası gözükmekteydi (o kadar kötüydü ki Alman yazar ve bilim heveslisi Goethe, Newton'un deneylerini tekrarladığında bir gökkuşağı görememişti bile). Newton prizma ile bir süre oynadıktan sonra bu kuramı test etmek için bir tane daha edinmeyi düşündü.

Eğer ışık spektrumu camdaki kusurlardan kaynaklanıyorsa, o zaman belirli bir rengi seçerek ikinci prizmadan geçirdi-

ğinde rengin bir defa daha değişeceğine hükmetti. Ama böyle olmadı; ışık aynı renkte kaldı. Daha da ilgi çekici olan şey, farklı renklerin prizma tarafından farklı miktarlarda kırılmasıydı. (Newton'un çalışmış olduğu kalitesi düşük prizmalar ile ne kadar başarılı olduğu ve sonuç olarak ne elde ettiğine ve ne yayınlayacağına ne kadar ikna olduğu hakkında bazı şüpheler mevcuttur. Ancak aslında olayı çözmüştür.) Newton beyaz ışığın tayfın tüm renklerinden oluştuğunu ve bu tayfın tamamının ışık ışını prizmadan geçerken farklı derecelere ayrılarak ortaya çıktığını gözlemledi.

Newton'un renklerin nasıl olup da gün ışığının içinde her zaman var olduğunu anlamasından sonra bir nesneyi neden belirli bir renkte gördüğümüzü kavraması zor olmadı. Mesela beyaz ışık kırmızı bir posta kutusuna çarptığında boya ışık ışınındaki renkleri emme eğiliminde oluyor, ancak kırmızı ışığı tutmayıp geri yolluyordu. Yani ışık gözümüze geri yansıdığında sadece kırmızı kalmış oluyor ve kutu kırmızı gözüküyordu. Newton'un fikirlerine karşı, özellikle azılı rakibi Robert Hooke'tan bir miktar direnç olsa da Newton'un görüşü sonunda zafere ulaştı. Ancak Newton ışığın korpüsküllerden oluştuğu konusunda başkalarını ikna etmekte daha az başarılı oldu. Bu konuda fikrini destekleyebilecek prizma deneyi gibi bir deney yapma şansı yoktu, sadece alternatif kuramdan duyduğu hoşnutsuzluğu dile getiriyordu ve dürüst olmak gerekirse bu kuramdan hoşnutsuz olmak ve şüphe etmek için iyi bir sebebi vardı.

Eterdeki dalgacıklar

Descartes'ın kuramı yoldan çekildiğinde ışığın parçacık olmasının alternatifi, durgun bir su birikintisine bir taş atıldığında oluşan dalgacıklar gibi, ancak iki boyut yerine üç boyutta ha-

reket eden dalgalar olmasıydı. Mesela Hollandalı bilimadamı Christiaan Huygens'in görüşü buydu. Sesin havada bir dalga şeklinde hareket ediyor olduğu zaten yaygın bir şekilde kabul görmüştü ve ses ile ışık arasındaki (sınırlı olduğu kabul edilen) benzerlikler, özellikle de duyma ile görme arasında kurulan insanmerkezci bağlantı, ışığın da bu şekilde yolculuk ediyor olduğu fikrini desteklemekteydi.

Ancak Newton, doğaya yerleştirdiği ekstra gereklilik sebebiyle dalga kavramını anlamakta oldukça makul bir şekilde zorluk çekiyordu. Parçacıklar boş uzayı kolayca geçebilir. Ancak dalgaların bir ortama ihtiyacı vardır. Bir dalga, temel olarak bir madde içerisinde meydana gelen bir hareketten ibarettir. Dalgalanmayı yaratacak bir şeyler olmalıdır. Ses için bu ortamın hava olduğu açıktı ve kısa süre önce bir kavanoza çalan bir zil yerleştirilip hava dışarı çekildiğinde bu açıkça gösterilmişti. Zilin sesi duyulmaz olmuştu çünkü sesin seyahat edeceği hava kalmamıştı. Ancak zil kaybolmamıştı; hâlâ görülebiliyordu. Yani ışığın dalgalarını yaratmak için havaya ihtiyacı yoktu.

Huygens, Descartes'ın plenumuna benzeyen, ancak katı olmak yerine küçük, sıkıştırılabilir parçalardan müteşekkil olan bir şeyler hayal etmişti; sanki uzay minik lastik toplarla dolu gibiydi. Işık bir dizi küçük dalgacık şeklinde bir toptan diğerine geçecekti.

Başlangıçta her iki kuramı da desteklemek için çok az deneysel kanıt vardı, ışığın bir maddeden diğerine geçerken kırıldığı sırada tam olarak ne olduğu hakkında her kafadan bir ses çıkıyordu. Ancak 19. yüzyılın başlarında Newton'un fikrine ölümcül darbeyi vuran, Young'un daha önce karşımıza çıkan iki yarık deneyi olmuş gibi görünüyordu (*bkz.* sayfa 17). Eğer ışık, Newton'un dediği gibi korpüsküllerden oluşmuş olsaydı, Young'ın her biri bir yarığa karşılık gelen iki parlak

şerit görmesi gerekirdi. Ancak bunun yerine görmüş olduğu, bir dizi açık ve koyu renkli şeritti. Bu sonuç, ışığın parçacıklardan oluştuğu görüşünü anlamsız hale getiriyordu. Ancak ışık eğer dalga ise, görmüş olduğumuz gibi, iki dalganın yaptığı girişim söz konusu açık ve koyu renkli şeritleri oluşturabilirdi.

Nasıl bir dalgalanma?

Young aynı zamanda dalganın frekansının (dalganın bir tepe noktasından diğerine ulaşması için gereken zamanın) ışığın rengine bağlı olarak farklılaştığını da (doğru) tahmin etmişti. Aslında bu, ışıkların farklı farklı renklerde olmasının sebebiydi. Deneylerinde ulaştığı sonuçlardan biri de şuydu: Rengi değiştirmek, dalga boyu değiştirildiğinde olduğu gibi, ekrandaki örüntünün değişmesine sebep oluyordu. Ancak Young, başkalarının fazla ileri gitmek olarak göreceği bir öneride de bulundu. Genel olarak ışığın, bir su birikintisinin yüzeyinde veya bir ipteki dalga gibi her yönde düzensiz hareketler yapmayıp, aynı ses gibi, seyahat ettiği yönde ileri geri salınım yapan bir dalga olduğu varsayılmaktaydı. Ancak Young, ışığın bir enine dalga yani seyahat yönünde bir aşağı bir yukarı devinerek ilerleyen bir dalga olduğuna dair kanıtlar bulunduğunu düşünüyordu.

Enine dalgalar sadece bir şeyin sınırlarında var olabileceğinden, bu, kuram için gerçek bir sorun teşkil etmekteydi. Sınırda dalgalar materyalden dışarı serbest şekilde uzanabilecekken materyalin merkezinden geçmeye çalıştıklarında, etrafındaki şeylere çarparak kısa süre içinde durulurdu. Ancak ışığın seyahat etmesine olanak veren, artık aydınlatıcı eter olarak bilinen şey her ne ise, ışık onun içinden çok rahat bir şekilde geçebilmekteydi. Bir dalga nasıl enine dalgalanabilirdi? Bu hareketin nasıl olup da sürdürülebildiğini kimse açık-

layamasa da Young, ışının seyahat yönüyle dik açı yapan yön ile ilişkili farklı ışık "türleri" gözlemleyebileceğiniz polarizasyon adı verilen bir etkiden haberdardı. Young, bunun sadece ışığın enine devinen bir dalga olmasıyla açıklanabileceğini düşünüyordu. Bunun nasıl mümkün olabileceği hakkında endişelenmek için daha iyi bir kuramı beklemek gerekiyordu.

Giderek daha fazla deney ışığın bir dalga halinde seyahat ettiğini doğrulamıştı, ancak dalgalanması için gerekli olan eterin mevcudiyeti hakkında bundan başka kanıt yoktu. Ve tüm uzayı dolduran, dokunma yoluyla tam olarak tespit edilemeyen, titreşme kabiliyetine sahip ve ışık dalgaları içinden geçerken enerji kaybı olmayacak kadar katı olan eter, gerçekten de tuhaf bir madde olmalıydı.

Faraday'ın spekülasyonu

1846'da Michael Faraday, etere neden ihtiyaç duyulmayacağı hakkında ilk açıklamayı yaptı. Gündelik hayatta oldukça kendi halinde biri olsa da Faraday büyük bir bilimadamıydı ve Kraliyet Enstitüsü'nde düzenli olarak ders vermekteydi. Söylentiye göre çağdaşı fizikçi Charles Wheatstone'un Enstitü'de bir Cuma akşamı bir ders anlatması gerekiyordu. Bu meseleler oldukça göz korkutucuydu. Geleneksel olarak konuşmacının hızla platforma çıkıp hiçbir giriş yapmadan konuşmasına başlaması beklendiğinden olay daha da ürkütücü bir hal alıyordu.

10 Nisan 1846 akşamı Wheatstone'un böyle bir kalabalığa hitap etme fikri karşısında sinirlerinin boşalarak sahneye çıkmadığı ve etkinlikten sorumlu kişi olan Faraday'ın çıkarak Wheatstone'un yerini doldurmak zorunda kaldığı söylenir. Bu güzel bir hikâyedir ancak muhtemelen doğru değildir. Bunun bir söylenti olduğunun düşünülmesinin sebebi

Faraday'ın, o gün konuşması beklenen asıl kişi olan James Napier'ın yerine kürsüye çıkacağını bir hafta önceden haber almış olmasıdır. Faraday Wheatstone'un elektrikli saat keşfi üzerine kısa bir makale sunmuş ancak daha sonra, ışık hakkındaki kendi görüşlerini anlatmaya devam etmiştir.

Görmüş olduğumuz gibi Faraday bir iletkenden yayılan ve manyetik alan çizgileri kesilince örneğin elektrik üreten bir alan fikriyle ortaya çıkmıştı. Şimdi de ışığın bu güç çizgilerinde meydana gelen bir titreşim (bir dalga) olduğunu öne sürüyordu. Madde içinde mekanik bir titreşim değil, zayıf bir güç alanı içerisinde bir dalga. Dersinde de söylemiş olduğu gibi kuramı "titreşimleri değil eteri ortadan kaldırmaya çalışıyordu". Eğer güç çizgileri düşünmemize yardım edecek hayali bir araçtan ibaret olmayıp gerçek bir alan oluşturuyorsa (bu her nasıl bir alan olursa olsun), sihirli bir etere ihtiyaç duymadan titreşimleri taşıyabilirdi.

Dalgaların etkileşimi

Michael Faraday bir matematikçi olduğunu asla iddia etmedi ve fikirleri ayrıntılı bir kuram olmaktan ziyade görsel bir temsildi. Ancak James Clerk Maxwell (*bkz.* sayfa 6) elektrik ile manyetizma arasındaki matematiksel tanımı ortaya koyduğunda ışığın doğasının anlaşılması yapbozunun son parçasını bularak Faraday'ın hipotezindeki boşlukları doldurdu. Maxwell garip bir şekilde eter fikrini asla reddetmedi (onun bu yaklaşımı en büyük bilim insanlarının bile fikirleri konusunda bir miktar tutucu olabileceğini göstermektedir). Aslında eteri bir alan olarak düşünerek hayranlık verici sonuca ulaştı.

Faraday manyetizmayı hareket ettirmenin elektrik ürettiğini ve elektriği hareket ettirmenin manyetizma ürettiğini gösterdi. Maxwell tam olarak doğru hızda hareket etmekte

olan bir manyetik dalganın bir elektrik dalgası üreteceğini, bu elektrik dalgasının da bir manyetik dalga üreteceğini ve bunun böyle devam edeceğini fark etti. Dalga ancak ışık hızında hareket ediyorsa kendi kendini sonlandırabilecekti. Maxwell şöyle diyordu: "Bu hız, ışık hızına o kadar yakındır ki, ışığın kendisinin (ışıyan ısı ve varsa diğer ışımalar dahil) elektromanyetik yasalara göre elektromanyetik alandan geçmekte olan dalgalar şeklinde bir elektromanyetik parazit olduğuna inanmak için güçlü sebeplerimiz var."

Işık hakkında günümüzdeki anlayışımızla karşılaştırıldığında bu, kuantum kuramından çok uzaktadır. Yine de, zaten görmüş olduğumuz üzere kuantum kuramının kökenini oluşturan şey, ışığın küçük paketler halinde gelmiş olması gerektiğiydi, Maxwell'in eter içindeki elektromanyetik dalgaları tamamen düz ve sürekliydi. Paket yoktu: tuhaf bir şey yoktu. Maxwell'in eterin mevcut olduğu varsayımı (Faraday'ın, eterin gerekliliğini ihmal etmiş olmasına rağmen), Amerikalı fizikçiler Albert Michelson ve Edward Morley'nin eter üzerinde çalışmaya koyulduğu 1880'lerin sonlarına dek baskın görüş olarak kaldı. Laboratuvarlarının parçası olarak Dünya'nın kendisini kullanmayı planlamışlardı.

Eter için bir sunak

Eter evrensel sabit, sabit olan ve her şeyin içinden geçiyor olduğu, her şeyin ölçülebilmesi için bir referans çerçevesi sağlayan bir şey olarak görülüyordu. Einstein sahneye çıkmadan çok önce Galileo'nun görelilik olarak bilinen kavramda göstermiş olduğu gibi eğer eter mevcut değilse, "tercih edilen bir çerçeve", tamamen hareketsiz bir şey olmayacağından bütün hareketlerin göreli (*bir şeye* göre) olması gerekirdi. Eter bu referansı sağlamaktaydı. Dünya, eter içerisinde Güneş etra-

fındaki yolculuğunu yaparken bu, gezegenin yanından bir eter akışının geçmesiyle sonuçlanmalıydı, bunun anlamı ise ışığın, Dünya'nın hareket yönünde veya hareket yönüne dik açılarda ölçülmesine bağlı olarak farklı hızlarda hareket etmesi gerektiğiydi.

Michelson ve Morley'in deneysel düzeneği, 19. yüzyıl sonunda kullanılmakta olan bir laboratuvarın son teknoloji ekipmanından ziyade bir ortaçağ katedraline aitmiş gibi gözüküyordu. Tuğla zemin üzerinde, simyacıların en sevdiği madde olan civa ile dolu yüksek kenarlı yuvarlak bir metal tepsi bulunuyordu. Bu sıvı metalin üzerine ahşap bir konstrüksiyon konmuş, onun da üzerine ağır bir taş platform yerleştirilmişti. Ekipman o kadar dikkatli bir şekilde inşa edilmişti ki, sabit bir hızda altı dakikada tam bir tur atarak dönecek şekilde bir defa hareket ettirildiğinde daha fazla müdahale olmaksızın saatlerce çalışmaya devam edebiliyordu.

Taş platformun tepesinde bir ışık ışınını ikiye bölen, iki parçayı da dik açılarda gönderen, daha sonra bunları, ışık dalgaları etkileşime girdiğinde üretilen girişim bantlarının izlenmesini kolaylaştıran bir mikroskopta birleştiren optik bir düzenek mevcuttu. Eğer her iki yönde yol alan ışık ışınlarının hızları arasında herhangi bir fark mevcutsa, bu, devasa ağırlık yavaş yavaş dönerken bantlarda bir kaymaya sebep olmalıydı. Sonuç büyük bir hayal kırıklığı oldu: Hiçbir fark tespit edilemedi. Eterin özelliklerinden birini ölçmek için tasarlanmış bir deney, nihayetinde eterin olmadığını gösterdi.

Işık dalgasının dalgalanacağı bir ortam olmaması kimilerini rahatsız etmişken, başkaları, dalga zayıf elektrik ve manyetik alanlarda sadece bir yer değiştirme olduğundan Faraday'ın artık bir etere ihtiyaç duyulmadığı görüşüne geri döndü. Ancak Planck kuantum kuramını geliştirdiğinde ve Einstein, bunu kendi kuramı ile fotoelektrik etkiye bağladı-

ğında, kimse parçacıkların bir etere ihtiyacı olduğunu düşünmediğinden ve ışık, esrarengiz bir şekilde bir dalga olduğu kadar bir parçacık gibi de gözüktüğünden, endişelenecek pek bir şey kalmadı.

Kudretli bir spektrum

Işığın kuantum kuramı kabul görmeye başladığında "ışık", görmemize aracılık eden şeyi anlatmak için kullandığımız bir terim olmaktan çıkıp çok uzun dalga boyundaki radyo dalgaları, mikrodalga, kızılötesi, gözle görülen ışık, morötesi, X-ışınları ve gama ışınlarının tamamını içeren dev elektromanyetik radyasyon spektrumunu kapsayan bir şey haline geldi. Işığın görebildiğimiz kısmı, bu aralığın ortasına denk gelen çok dar bir aralıktı. Bu tanımların tamamı insan ürünüdür. Mesela radyo dalgaları ile mikrodalgalar veya morötesi ile X-ışınları arasında bir sınır mevcut değildir. Uçakların güvenli bir şekilde uçmasını sağlamak için kullandığımız radar ile nükleer bir patlama sonrası ortaya çıkan ölümcül gama ışınları arasında frekans veya enerji haricinde bir fark yoktur.

Işığı bir dalga olarak düşünecek olursak, spektrumda yukarı doğru hareket ettiğimizde giderek kısalan dalga boyları veya giderek artan frekansta bir elektromanyetik dalga elde ederiz. Kuantum şapkası takıldığında resim daha da basitleşir, düşük enerjili fotonlardan yüksek enerjili fotonlara geçmek, mesela X-ışınlarının vücuttan geçerek DNA'ya hasar vermesi gibi farklı özellikler, enerji seviyesinin artmasıyla ortaya çıkmaktadır.

Işık ile maddenin dansı

Kuantum kuramının gelişmesiyle ortaya çıkan şey, ışık ile maddenin nasıl etkileştiğinin anlaşılması olmuştu. Kuantum

fikri ilk kez sıcak maddenin nasıl ışık yaydığına bir açıklama getirmek için ortaya atılmışken, Einstein'ın çalışmaları, ışığın metale çarpması ve elektronları serbest bırakmasına dayanıyordu. Işık ile maddenin etkileşiminin fiziksel dünyada sadece küçük bir yer işgal ettiği düşünülebilir, ancak bunun en önemli yerlerden biri olduğu kanıtlanmıştır. Işığı madde üretir. Gezegenimizi ısıtan ve görebilmemizi sağlayan şey ışık ile maddenin etkileşimidir. Ve sandalyenin içinden geçip yere düşmemeniz için vücudunuz ile sandalye arasında cereyan eden elektromanyetik itme gibi temel bir etkileşim dahi atomlar arasından süzülen, asla gözlenmemiş bir foton akışının sonucudur.

Işık ile madde arasındaki, kuantum elektrodinamiğinin kısaltması olan KED adı verilmiş olan bu etkileşim hakkındaki bilgimiz çok sayıda kişinin çalışmasının ürünüdür, ancak bunlardan biri kaçınılmaz olarak öne çıkmaktadır. Bu alanda temeli atan çalışma Britanyalı münzevi fizikçi Paul Dirac'ınkidir ancak KED'i oluşturan en meşhur yaklaşım, Dirac'ın bir çağdaşından gelmiştir. Bu kişi günümüzde her fizikçinin "ünlüler" listesinde ilk sırayı işgal eden, fizikçilerin fizikçisi, Amerikalı dahi Richard Feynman'dır.

Feynman dokunuşu

Feynman'ın popülerliği, birtakım etmenleri birleştirmektedir. Çoğu araştırmacının içe dönük olduğu bir alanda (bu bugün hâlâ böyledir) o dışa dönük biri ve harika bir iletişimciydi. Aynı zamanda, işleri yürütmek için sadece mevcut yöntemlere dayanmayarak fizikteki sorunlara meslektaşlarının çoğundan farklı bir gözle bakma yeteneğine de sahipti. Öyle görünüyor ki bu görüş genç Richard'a çok küçükken babası Melville tarafından aşılanmıştı. Babası Melville Birinci Dün-

ya Savaşı'nın son aylarında doğan Richard'ı gerçekte neler olup bittiğini anlamaya çalışırken etiketlerin ötesine bakmaya özendirmişti.

Feynman Princeton'a gitmeden önce MIT'de okudu. Doktorası için bir konu ararken kuantum kuramı hakkında Dirac'ın yazmış olduğu bir makaleye denk geldi. Bu kuantum etkilerinin daha basit bir tanımını yapabilmek için Britanyalı fizikçinin çalışmalarını nasıl genelleyebileceğini düşünmeye başladı. Feynman matematiğe çok görsel bir yaklaşım geliştirdi ve parçacık "dünya çizgileri" fikrinden yararlandı. Feynman diyagramlarında bir eksende zaman, diğerinde uzaydaki konum olmak üzere bir parçacığın zamana karşı görünümleri bulunmaktadır. Zaman ile mekân ilişkisini gösteren geleneksel diyagramlarda (dünya çizgisi diyagramlarında) zaman mutlaka sayfada dikey ve yukarı doğru ilerleyecek biçimde ve konum yatay olarak ve sağa doğu değişecek biçimde belirtilir ancak Feynman diyagramları her iki şekilde de çizilebilir.

Yani zaman yukarı doğru ilerlerken sabit bir parçacık yatay bir çizgi olarak tanımlanacak, sabit bir hızla hareket eden parçacık ise diyagonal düz bir çizgi olacaktır. Elbette gerçek hayatta parçacıklar üç boyutlu uzayda hareket edebilir, ancak bu Feynman'ın diyagramını dört boyutlu hale getirir ve bunun çizilmesi de çok zordur. İşleri basit tutmak için, diğerlerinin varlığını da unutmadan sadece rastgele yatay bir boyutu ele alırız.

Kuantum kuramı bir parçacığın aynı anda hem hızının hem konumunun kesin olarak belirlenemeyeceğini ortaya koymuştu. Feynman da parçacığın başlangıç ile varış noktalarını bağlayacak şekilde mümkün olan tüm dünya çizgilerini çizdiğini hayal etti. Her biri bir başka olasılığı temsil eden bu çizgileri bir araya getirirseniz parçacığın nasıl davrandığının eksiksiz bir tanımını elde edersiniz. Bir parçacığın A nokta-

sından B noktasına gitmesi için sonsuz sayıda yol mevcuttur, ancak Feynman bunun bir sorun olması gerekmediğini fark etmişti. Nihayetinde integral almanın amacı, sonsuz sayıda küçük miktarı toplayarak sonlu bir ürün elde etmektir. Ve en nihayetinde yolların çoğu pratikte birbirlerini sadeleştirecek veya olasılıkları o kadar küçük olacaktır ki ihmal edilebileceklerdir.

Zamanında Feynman'ın fikri hesaplama için pratik bir araç değildi ancak tezi için yeterliydi. İkinci Dünya Savaşı araya girdiğinde doktorası için kolay bir sonuca razı oldu. Japonların Pearl Harbor'a saldırdığı 1941 Aralık ayında, zincirleme nükleer reaksiyon prensibine dayanan bir bombayı üretmek üzere son derece gizli olarak yürütülen bir projede yer alıyordu. Bu, atom bombasıydı.

Kuantum yıkımı

Feynman, uranyum izotopu U-235'i çok daha yaygın olan ve kimyasal olarak ayırt edilemeyen U-238'den ayırma yollarını arayan bir ekiple çalışırken doktorasını bitirdi. Evlenmeye hazırlanıyordu ve nikâhtan önce okulla işi bitsin istiyordu. Nişanlısı Arline ile bir süredir birlikteydiler ancak olayı hızlandıran, nişanlısının ilerleyen tüberkülozu olmuştu. 1942 Temmuz'unda hastanede evlendiler.

Bu esnada uranyum ayrıştırma üzerine çalışması daha iyi bir yöntem bulununca gereksiz hale gelen Feynman Manhattan Projesi'nde daha etkin biçimde görev alabilmek için New Mexico eyaletindeki Los Alamos kentine taşındı. Proje'de görev almayı Arline'e yakınlarda bir hastane bulunması şartıyla kabul etti. Bulabildikleri en yakın hastaneyse 100 km uzaktaki Albuquerque kentindeydi. Feynman bombaların yapılabilmesi için gerekli olan karmaşık hesaplamalar üzerinde

çalışırken Arline giderek zayıfladı ve 1945 Haziran'ında öldü. Sadece bir ay sonra ilk nükleer bomba, Los Alamos'un 320 km güneyindeki Alamogordo'da Feynman'ın da hazır bulunduğu Trinity testinde patlatıldı.

Feynman hem bilimsel faaliyetleri hızlandırarak, hem de askeriye ile kaçınılmaz şekilde kültürel bir çatışmaya giren bilim insanlarının moralini yükselterek Los Alamos'taki çalışmalara devasa bir katkıda bulundu. Bunu başarmak için başvurduğu yollardan biri askeri hayatı belirleyen gündelik kurallara sürekli meydan okumaktı; üsse görünmeden girip çıkmakta ve kilitli dolap ve kasaları açmak için yollar bulmakta ünlenmişti. Sivil hayata döndükten sonra, doktorasında ele aldığı konuyu araştırmaya devam etti. Işık ile maddenin etkileşimine dair en son kuram olan kuantum elektrodinamiği (KED) böyle ortaya atılmış oldu.

Fiziğin uğraşı

Kuram Harvard'da Feynman ve Julian Schwinger ile onlardan bağımsız olarak Japonya'da Sin İtiro Tomonaga tarafından farklı ancak birbirlerine paralel yollarla geliştirilmişti ancak kuramı, ışık fotonları ile elektronlar arasındaki etkileşimin anlaşılabilmesi için elverişli hale getiren, Feynman'ın çalışması olmuştu. Temelde ışık ile madde arasındaki her etkileşim, pratik olarak çok basit unsurların bir bileşimiydi. Ya bir elektron enerji kaybeder ve bir foton saçar ya da bir elektron enerji emer ve bir foton kaybolur. Fotonlar, elektronlar enerji kaybederken doğar ve enerjileri yükselirken ölür.

Bu, gerçekliğin sadece küçük bir kısmı gibi gözükse de KED aslında gündelik hayatımızın takdire şayan büyüklükte bir parçasını kapsar ve bunu çarpıcı bir başarıyla gerçekleştirir. Tüm fizik kuramları arasında KED'in tahminleri, ger-

çekte gözlemlenen ile en yakın olanlardır. Feynman'ın da göstermekten zevk aldığı gibi KED, gözlemlerle o kadar iyi uyuşur ki, kuram sanki New York ile Los Angeles arasındaki mesafeyi, bir saç kılı eninde hata payıyla tahmin etmiş gibidir. Feynman görünürdeki bu mükemmelliğin bize bir sorun bıraktığını da fark etmiştir, çünkü KED tecrübe ettiğimizi düşündüğümüz sağduyulu dünyayı tanımlamaz. Bunun yerine parçacıkların, aynı anda mümkün olan yolların tamamını göz önüne alıyormuş ve hatta bazen zamanda geri gidiyormuş gibi olduğu kuantum tuhaflığına dayanır. Yine de kuram, gerçek hayatta gözlemlediğimiz sonuçları tahmin etmekte kayda değer şekilde hassastır.

Feynman dünya çizgisi diyagramlarını gerekli olan yerlerde, bir saatin yelkovanına benzeyen bir oktan oluşan ilave bir karmaşıklık ekleyerek kullanacaktı. Bu ok zaman geçtikçe yavaşça dönmekteydi ve okun büyüklüğü (daha kesin konuşmak gerekirse büyüklüğünün karesi), bir parçacığın belirli bir konumda bulunması olasılığına işaret etmekteydi. Pusula iğnesine benzeyen bu ok, parçacığın fazı adı verilen bir özelliğini temsil etmekteydi ve bir parçacık ile bir dalga arasındaki arayüzü sağlamaktaydı. Faz, dalga hareketinde zaman ve mekandaki konumu temsil etmekteydi. Zamanla düzenli bir şekilde dönmesi, parçacığın gözlemlenmiş olan dalga benzeri etkiyi üretmesini sağlıyordu.

Feynman faz oklarıyla donanmış diyagramlarına fotonları bir kere yerleştirdiğinde, klasik fiziğin ışığın bir parçacık akışı olduğu fikrine karşı yönlendirmiş olduğu sorunların hepsinin (mesela ışığın bir yüzeyden nasıl yansıdığı veya ikinci bir ışık ışınıyla nasıl etkileşime girdiği) bu yapının bir sonucu olduğunu fark etmişti. Parçacıklarınız bir defa faza sahip olduğunda, artık geleneksel dalgaları düşünmek zorunda de-

ğildiniz. Bu, fizikçilerin artık dalgaları *düşünmediği* anlamına gelmemektedir. Neler olup bittiğini tanımlamak veya sonucu hesaplamak için bazen en kolay yoldurlar. Ancak artık önemli değillerdir. Fiziğin uğraşı gerçekliği tanımlamak değildir; bunu hiç akıldan çıkarmamalıyız. Fiziğin uğraşı, gözlemlemiş olduğumuz şeyin sonucunu olabildiğince isabetli şekilde tahmin etmemizi sağlayacak bir model oluşturmaktır.

Işık ... ışıktır

Fizik okumaya başladığımda bir profesöre şunu sorduğumu hatırlıyorum: "Peki ama ışık tam olarak nedir? Bir dalga mıdır, yoksa bir parçacık mı?" Hoca sızlanmıştı. Feynman ara sıra, tamamen parçacık yanlısı gibi gözükmekteydi. Şöyle yazıyordu: "Işığın bu halde (yani parçacık halinde) geldiğini vurgulamak istiyorum. Işığın parçacıklar gibi davrandığını, özellikle de okula gitmiş ve muhtemelen ışığın dalgalar gibi davrandığını öğrenmiş olan sizlerin bilmesi çok önemlidir. Size nasıl *davrandığını* söylüyorum; parçacıklar gibi." Feynman söylediklerinde haklıydı. KED'e yaklaşımı ışığın bir parçacık olduğunu varsayıyordu ve işe yarıyordu. Dalgalar gerekli değildi. Ancak etkileyici sözler sarf etmesine karşın ışığın kelimesi kelimesine parçacık olduğunu söylemiyordu.

Her şey bir yana KED bir kuantum alan kuramı olup ışığa bazı açılardan ne bir parçacık, ne de bir dalga gibi davranmayıp, ışığın zaman ve mekânda bir dizi değere sahip bir alan olduğunu kabul eder. Günümüzdeki fizikçilerin çoğu aslında ışığı pratikte böyle görürler. Ancak fizikçilerin bir bölümü bunun aksini iddia etse dahi ışığın alanda bir bozulma olduğu fikri de gerçekliğin doğru bir tanımı değildir.

Işık bir parçacık, bir dalga veya alanda bir bozulma değildir. Işık ışıktır. Doğrudan asla gözlemleyemeyeceğimiz veya

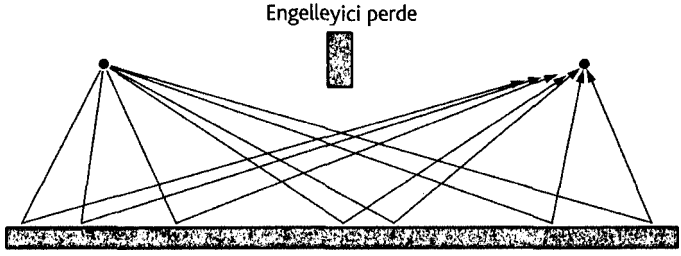
tanımlayamayacağımız bir kuantum seviyesinde çalışmaktadır. Bir aynadan yansıyan ışık, duvardan seken bir tenis topu veya bir engelle karşılaşan bir dalga değildir. Bunlar, olup biten şeyleri temsilen zihnimizde canlandırabileceğimiz büyük ölçekli nesnelerdir, ancak ışık gerçekte bunlara benzemez. Işık bir alanda oluşan parazitin sonucu da değildir; bu, sadece güvenilir sonuçlar üretmek için kullanılan matematiksel bir yaklaşımdır. Üçü de sadece tahminler yapmamıza olanak veren temsiller, bilim insanlarının deyişiyle modellerdir. Bazen dalga, bazen de parçacık modelini kullanmak daha kolaydır. Matematiksel açıdan, alan yaklaşımı en evrensel ancak zihinde canlandırılması genellikle en zor olan yaklaşımdır. Her biri ara sıra faydalıdır. Hiçbiri gerçekliğin hakiki bir resmi değildir.

Yansıma üzerine

Feynman'ın yaklaşımının devrimci doğasını ve bu özel parçacıkların davranışının, ışığın bir dalga olarak düşünüldüğü zamankiyle aynı sonuçlar vermesinin yanı sıra bazı koşullarda gerçekte neler olup bittiğini nasıl daha iyi tahmin ettiğini daha iyi anlayabilmek için ortaçağ kadar eski olan basit bir optik düzeneğe, bir aynadan yansıyan ışık ışınına bakalım. Okulda muhtemelen ışık demetinin veya "ışının" düz bir çizgi halinde aynaya doğru yol aldığını ve aynaya hangi açıyla gelmişse aynadan aynı açıyla (ancak ters yönde) yansıdığını öğrenmiştiniz. Bu kullanışlı bir basitleştirmedir, ancak neler olup bittiğini anlatan en iyi model olmaktan çok uzaktır.

İlk olarak ışık, duvardan seken bir top gibi aynadan sekmez. Gelen bir foton, aynadaki bir elektron tarafından emilir ve daha sonra elektron tarafından ikinci bir foton yayılır. Ay-

naya gelen ile aynadan ayrılan aynı ışık değildir. Ancak daha da önemlisi foton, A'dan B'ye gitmek için istediği herhangi bir yolu izleyebilir. Örneğin geldiği açıyla aynı açıyı yaparak aynanın ortasından sekmek yerine çok daha dar bir açıyla gelerek çok daha uzağa ulaşır ve daha sonra daha geniş bir açıyla uzaklaşabilir. Bu yollardan herhangi birini izleme olasılığı aşağı yukarı aynıdır. Peki, o zaman neden aynaya gelme ve aynadan ayrılma açıları aynı olan bir ışık demeti görüyoruz?



Şekil 3. Çok yollu yansıma

Aslında pek çok yansıma yolu ve geleneksel ışın yansıması simetrisinin sonuçları aynıdır. Eğer işin matematiğini yapar ve faz pusula oklarını hesaba katarak olası yolların tümünü toplarsanız yolların çoğu birbirlerinin etkisini sadeleştirir ve başlangıçta beklediğiniz yola, eşit açılarda yansımaya ulaşırsınız. Ancak hakikat bundan daha karmaşıktır. Eğer bir ayna alır ve ışığın yansıdığı orta kısmını kesip çıkartırsanız bir yansıma göremezsiniz. Ancak kalan parçalarından birinin üzerine siyah çizgiler çizerek fotonun benzer fazlara sahip olacağı yolaklar bırakırsanız yansıma geri gelir; yere çarpan bir topun böyle çılgınca sektiğini görseydiniz çok şaşırırdınız.

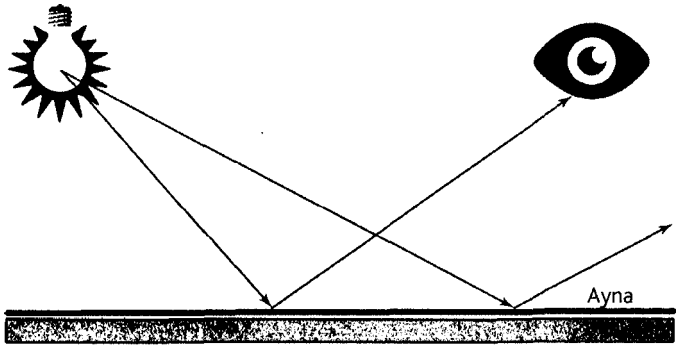
Olasılıksal anlamda bir foton, yansıma için yolların her birini izler ama fazların birbirlerini sadeleştirmesi sebebiyle biz sonucu görmeyiz.

Kolay yolu seçmek

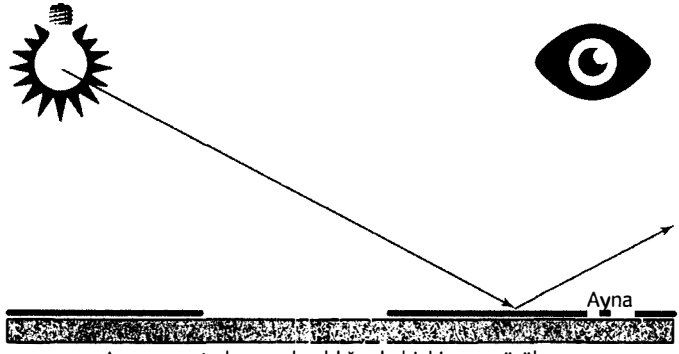
Işığın bir aynadan yansıması, evrenin çok temel başka bir yönüne de ışık tutmaktadır; bize evrenin tembel olduğunu anlatmaktadır. Buna bazen en küçük eylem ilkesi adı verilir. Bize mesela bir topun izleyeceği rotayı söyler. Bu durumda fizik anlamında "eylem", potansiyel enerji (topun kendisini Dünya'ya doğru çeken bir kütleçekimi alanında kalmasıyla biriken enerji) ile topun hareketinin kinetik enerjisi arasındaki farktır. Topun izlediği yol, bu "eylemi" asgariye indirendir. Işık da buna benzer şekilde, kendisini hedefine en kısa sürede ulaştıracak yolu seçerek en kısa zaman ilkesine riayet eder.

Bunun her zaman düz bir çizgide seyahat etmeyi içereceği düşünülebilir; genellikle de böyle olur. Ancak ışık mesela havadan cama veya havadan suya geçerken kırılma adı verilen süreç ile eğilir. Bu özel durumda en kısa zaman ilkesine bazen *Cankurtaran* İlkesi adı da verilir. Cankurtaranlar, ışığın hangi yolu izleyeceğine neyin karar verdiğini anlamış gibi gözükmektedir. Kumsalda otururken birinin boğulmakta olduğunu fark eden bir cankurtaran, talihsiz yüzücüye, karada kat edeceği mesafeyi uzatma pahasına suda kat edeceği mesafeyi asgariye indirerek ulaşır çünkü en hızlı yüzücü bile suda, karada olduğundan daha yavaş yol alır. Benzer bir şekilde ışık da su ve cam içerisinde daha yavaş ilerlediğinden havada, su ve cam içerisinde olduğundan daha uzağa gider. En az zaman alacak yolu izler ve kırılma bandını oluşturur.

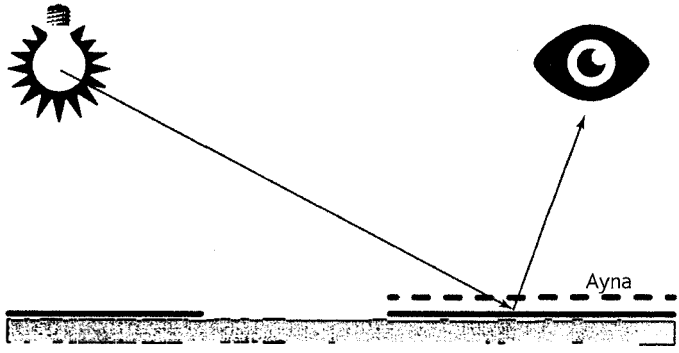
Işığın bir aynadan yansırken A'dan B'ye gitmek için izleyebileceği farklı yolların tümüne bakarsak aynanın ortasına yakın olan yolların (Şekil 5'te 5 ila 9 numaralı yollar) en kestirme yollar olduğunu görürüz. Merkezden uzaklaşmaya başladığımızda yol yavaş yavaş uzamaya başlar. Bunun anlamı, bu merkezi yollardaki fotonların aşağı yukarı aynı yöne işaret eden faz oklarına sahip oldukları ve birbirlerini destek-



Eşit açılarda normal yansıma.



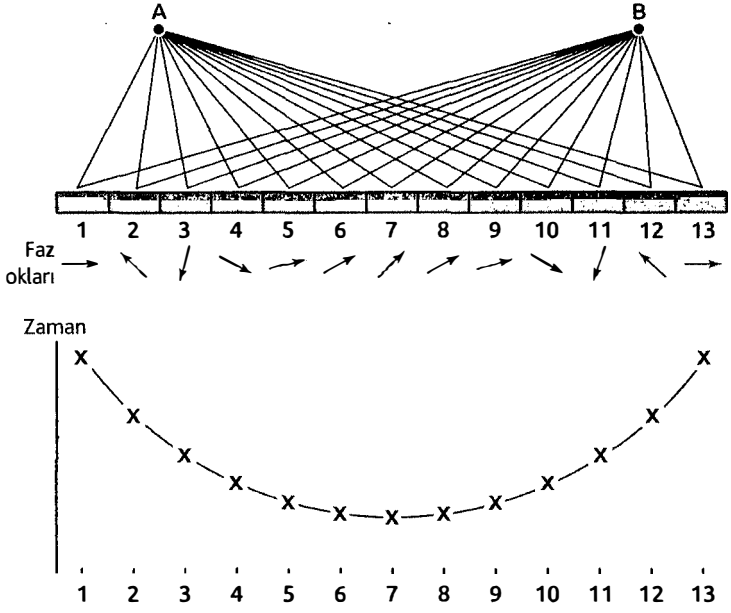
Aynanın orta kısmı çıkarıldığında hiçbir şey görülmez.



Aynanın kalan kısımlarından birinin üzerine siyah çizgiler çizildiğinde tuhaf açıyla yansıma tekrar görülür.

Şekil 4. Eksik yansıma

ledikleridir. Merkezden uzaklaşıldığında yolun uzunluğu giderek daha hızlı bir şekilde artmaya başlar ve okun çok farklı bir yöne bakması ve bir fotonun fazlarının birbirlerini etkisiz hale getirmesi ihtimali artar. Richard Feynman KED yaklaşımına, en kısa zaman ilkesi ve bu ilkenin fotonlarla ilgili olası sonuçları hakkında düşünerek ulaşmıştır.



Şekil 5. Farklı yansıma yolları

Işığı düz çizgiler halinde yol alıyormuş gibi görmemizin ve genellikle A'dan aynaya ve aynadan B'ye uzanan sadece düz çizgileri göz önüne almakla yetinmemizin sebebi de budur. Aslında bir fotonun (B'den A'ya gitmek dahil) A ile B arasındaki olası yollardan herhangi birini izlemesi olasılığı mevcuttur. Ancak bu yollar en kısa zaman ilkesini ihlal etmektedir ve foton düz çizgiden uzaklaşır uzaklaşmaz faz saatine düz çizgide ilerleyen bir fotondan kendisini etkisiz hale

getirmesini engellemesine yetecek kadar uzaklaşma şansı verir; ama düz çizgiye en yakın olan yollar neredeyse tamamen aynı yöne işaret eden faz saatlerine sahiptirler ve birbirlerine eklenirler. Düz çizgi "gerçek" yol değildir, sadece diğer saatler birbirlerini etkisiz hale getirince geriye kalan şeydir.

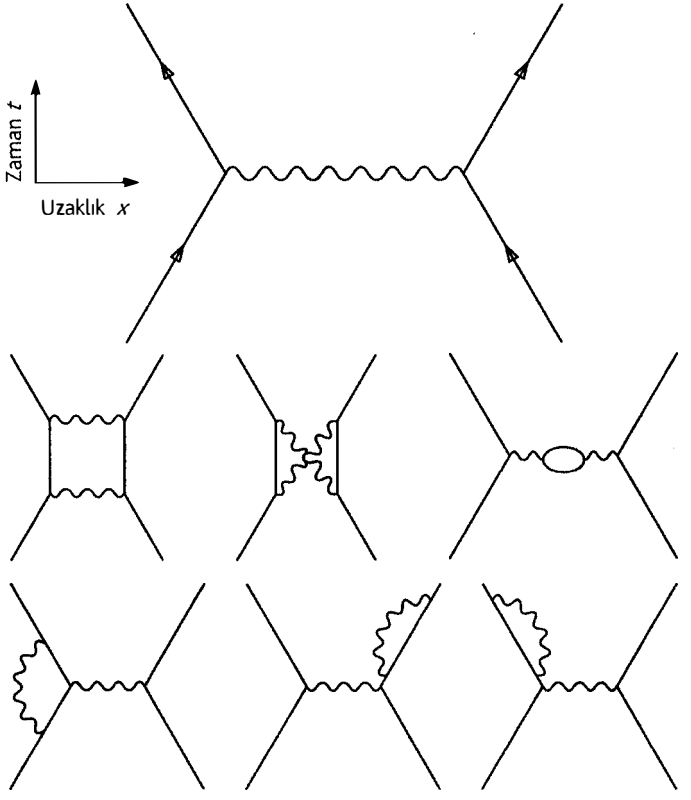
Sihirli aynalar

Gerçek dünyada yansıma daha karmaşıktır. (Aslında doğruculuk yapmak gerekirse gerçek dünyanın bir fizik deneyiyle karşılaştırıldığında neredeyse her zaman daha karmaşık olduğunu söylemek gerekir.) Basit yansıtma deneyi, işleri basit tutmak için genellikle tek bir renkteki ışıkla yapılır. Işığın rengi fotonlarının enerjisine, ancak ışık bir dalga olarak düşünüldüğünde dalga boyuna da dayanır, bu da farklı renklerdeki ışıkların küçük faz oklarının farklı hızlarda dönüyor oldukları anlamına gelir. Bu, merkezden farklı açılarda yansıma olması için farklı renklerin fazlarının eklenerek arttığı anlamına gelir. Eğer mümkün olan fazların sadece bazılarını seçerek, merkezi ortadan kaldırıp kırılma derecesi olarak bilinen bir dizi siyah çizgi kullanarak (bu, yukarıda Şekil 4'te yapılan şeyin birden fazla renkle tekrarlanmasıdır) fotonları tuhaf bir açıda gitmeye zorlarsak farklı renkler birbirlerinden ayrılacaktır. Siyah şeritlere sahip bu özel aynalardan birine beyaz ışık tutulduğunda bir gökkuşağı görürsünüz.

Bu herhangi bir kimsenin evde yapabileceği bir deneydir çünkü çoğumuzun evinde, yüzeylerinde bu karanlık çizgilerle benzer bir etki yaratacak küçük slotları olan diskler (CD'ler ve DVD'ler) mevcuttur. Bir diski beyaz ışığa belli bir açıyla tuttuğunuzda, KED'in tahmin etmiş olduğu beklenmedik yöndeki yansımaya benzer gökkuşağı etkileri görürsünüz.

Dört bir yana

Feynman'ın yaklaşımını, fotonları veya elektronları içersin veya içermesin, iki yarık deneyinin kuantum versiyonuna bakmanın farklı bir yolu olarak da kullanabiliriz. Buna Bölüm 2'deki yaklaşımımız, bir fotonun bir konumu bulunmadığını söylemekti. Bundan önce mevcut olan tek şey ekrana çarpması ve yarıklardan geçerken dalganın bir etkileşim yaratmasına yol açan dalga olasılığını göstermiş olmasıydı. Feynman, fotonun kaynağı ile ekranda tespit edildiği yer arasındaki olası her yolu izlediğini düşünebileceğimizi söylemişti.



Şekil 6. İki basit elektron etkileşimini gösteren Feynman diyagramları

Bir an düşünün ve bunun akıllara durgunluk verecek kadar çılgınca bir şey olduğunu varsayın. O zaman, bu kitapta daha önce tanışmış olduğumuz "Occam'ın usturası" fikrinin sahibi olan Ockham'lı William'ın bu konuda söyleyecek bir şeyleri olurdu ("Ockham" sözcüğü eskiden "Occam" diye yazılıyordu). William'ın ilkesine göre, yol gösteren başka bir şey yoksa en basit kuramı kabul etmemiz (kesin konuşmak gerekirse "varlıkları gereksiz yere çoğaltmamamız") gerekiyordu. Ancak Feynman'ın hayal gücü bir varlığı sonsuz defa çoğaltır. Fotonun ekrana ulaşmadan önce olası düz yolların her birini izlediğini, adeta, olabilecek en düz yolları izleyerek yarıkların her ikisinden geçtiğini söylemiyoruz. Şunu söylüyoruz: Mesela foton uzaya doğru hareket ediyor, Güneş'in etrafında bir tur atıp ekrana gitmek üzere karaya dönüyor.

Ancak görmüş olduğumuz üzere bu yolların büyük kısmı birbirlerini sadeleştireceklerdir veya gerçekleşme olasılıkları ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Yine de olası her yolu izlediğini hayal edersek, foton, bir parazit motifi üretmek dahil, olasılık dalgasının yapabileceği her şeyi yapabilir. Yollara eklenen olasılıklar mevcut olduğundan ve "izler" kelimesi yüzde 100 gerçekliği ima eder gibi gözüktüğünden fotonların aynı anda birden fazla yerde bulunduğu varsayımına ulaşmamıza sebep olabileceği için fotonun her yolu 'izlediğini' söylemek tam olarak doğru değildir, ancak bu, kuramda yanlış bir şeyler olduğuna değil, konuşma dilinin kuantum sorularına uygulanmasında bir sorun olduğuna işarettir. Fazlar ve olasılıkları akılda tutarak kuantum parçacığının izleyebileceği olası her yolu alıp topladığımızdan sonuç (ve Feynman'ın yöntemi) genellikle "yolların toplamı" (veya bu kadar basit kelimeler kullanmaktan utanan matematikçiler için "yol integrali formülasyonu") şeklinde tanımlanır.

Evrenin yapıştırıcısı

Richard Feynman, ismiyle kalıcı olarak ilişkilendirilecek ve günümüzde dahi kuantum fiziğinde son derece kullanışlı olacak olan diyagramları geliştirirken fotonların etkileşime girdiği parçacıkları tanıtmıştı. Bu süreçler, görebildiğimiz ışığın maddeyle nasıl etkileştiğini açıklamakla kalmamış, ayrıca (başlangıçtaki parçacıklarından asla kaçamayan sanal fotonlar adı verilen) göremediğimiz ışığın anlaşılmasında da işe yaramışlardı. Bunlar, mesela bir atomun yapısının anlaşılması bakımından çok değerli hale geleceklerdi.

Niels Bohr, elektronların bir foton verir veya alırken sadece aralarında sıçrayabilecekleri yörüngelerde sabitlendiklerini öne sürmek için Planck ve Einstein'ın kuantum parçacıklarıyla ilgili çalışmalarını kullanmıştı. Ancak atomun çekirdeğine çok yaklaşamayacak şekilde sınırlanmışlardı. Nihayetinde elektronlar negatif, çekirdek de pozitif yüklüdür. Elektronlar çekirdeğin içine dalmak için tuhaf bir dürtü hissetmelidirler. Ancak elektronları belirli bir mesafede tutmak, sanal fotonların elektronlar ile çekirdek arasında sürekli seyahat etmesi demektir. Bir anlamda içinizdeki her atom ve çevrenizdeki her şey, maddeyi birleştiren "yapıştırıcı" olarak iş gören ve asla kaçmayan bir ışıkla parlamaktadır.

Alanlardan bir seri

Uzayda parçacığın geçtiği düşünülen her noktada fazı (yelkovanın yönü) ve olasılığı (yelkovanın büyüklüğü veya daha kesin konuşmak gerekirse büyüklüğünün karesi) işaret eden küçük saatin ve olası her yolu izleyen bir fotonun resmini çizince, bir anlamda Faraday'ın görüşüne geri geliriz ama bu kez elimizde Faraday'ın tasavvur etmemiş olduğu,

Schrödinger'in denklemi ve diğer kuantum mekaniği denklemleri tarafından tanımlanan matematiksel bir kesinlik bulunur. Faraday elektrik ve manyetizmayı alan terimleriyle düşünüyordu ve sonsuz sayıda saatten oluşan dizimiz, aşağı yukarı bir alanı tanımlamanın alternatif bir yoludur. KED'e kuantum alan kuramı adı verilir çünkü neler olup bittiğini açıklamak için "alan" yaklaşımını izler. Gözlemlediğimiz sonuçları açıklamak için genellikle en pratik matematiksel yol olduklarından, böyle kuramlar modern fizikte çok yaygındır.

Alanların aslında var olmadığını varsaymak kolaydır; en nihayetinde çok tuhaf şeyler, farklı yerlerde farklı değerler alarak evren boyunca uzanan matematiksel varlıklardır. Onları sadece bir matematikçi veya kuramsal fizikçi sevebilir. Burnumuza bir aşırı güç kullanımı kokusu gelir. Alanların durumu parçacıklardan farklıdır; A'dan B'ye hareket eden küçük bir top ile bir parçacık arasında benzerlik kurulabildiği için, parçacık fikrinin kabul edilmesi daha kolaydır. Ancak kuantum parçacıklarının davranışlarının bir topa hiçbir şekilde benzemediğini aklımızda tutmamız gereklidir. Bir alan kullanmak, bir parçacık kullanmaktan daha doğru veya daha yanlış değildir. Tamamıyla eşdeğer modellerdir ancak alan yaklaşımı sonuçları hesaplamak için genellikle en pratik yaklaşımdır.

Renk sorunu

Feynman diyagramları, parçacıklar arasındaki bir etkileşimde neler olup bittiğini görsel olarak anlamak için çok kullanışlıdır, aynı zamanda genel bir sonuç üretmek için her bir diyagrama olasılıklar atanarak parçacıkların nasıl davranacaklarının hesaplanması için de dayanak noktası olmuşlardır.

Sonsuz sayıda farklı etkileşim olduğundan ilkesel olarak bu uzun bir görevdir ancak daha belirsiz kombinasyonlarla olasılıklar hızla azalır, giderek daha fazla sanal parçacık eklenir ve bu, genel olarak fazladan sadece birkaç katman ilerlenebileceği ve gerisinin ihmal edileceği anlamına gelir. Feynman diyagramları hâlâ bu şekilde kullanılmaktadır. Ancak bazı bakımlardan sorunludurlar.

Özellikle çekirdek parçacıklarını dahil etmek için diyagramların kapsamı genişletildiğinde sorunlar ortaya çıkar. Atomların çekirdeğini oluşturan görece devasa parçacıklar olan nötronlar ile protonlar, kuarklar adı verilen temel parçacıkların üçlü gruplarından meydana gelmektedirler; kuarklar da, fotonların elektromanyetizmada oynadığı role eş bir rol oynayan gluonlar ile birbirlerine bağlıdırlar. KED'in kuarklar ve gluonlar için geçerli olan muadili ise kuantum kromodinamiği veya KKD'dir. Bu isim gluonların kırmızı, yeşil ve mavi renklerle birbirlerinden ayrılan üç farklı "tatta" gelmeleri gerçeğine dayanmaktadır. Gluonlar aslında renkli değildir (ışıkla etkileşime girmediklerinden bu kavram anlamsızdır), renk isimleri tamamen keyfidir.

Renksiz foton ile karşılaştırıldığında rengin katmış olduğu bu karmaşıklık, KKD için çizilen Feynman diyagramlarının çok daha karmaşık olması ve sayılarının kontrolden çıkması anlamına gelmektedir. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı gibi bir parçacık çarpıştırıcıda çok yaygın bir işlem olan, (daha düşük enerjili) yeni dört gluon oluşturmak için iki gluonu çarpıştırmak dahi, katkıların ihmal edilebilir olması için 220 diyagramın değerlendirilmesi ve milyonlarca terimle yapılan bir hesaplama anlamına gelir. Kuarklar ve gluonlar ile başa çıkmanın daha iyi bir yolu olmalıydı ancak bu yol, 21. yüzyıla kadar ortaya çıkmayacaktı.

Fiziğin mücevheri

1980'lerde Illinois'deki Fermi Ulusal Hızlandırma Laboratuvarı'nda çalışmakta olan Stephen Parke ve Tommy Taylor, (aşağı yukarı tahmin yoluyla) iki gluonun etkileşimi için diyagramlar ve hesaplamaların hepsinin yerini alan basit bir matematiksel ifade geliştirdiğinde bir ipucu belirmişti. Bu ilk ilham adımının ötesine geçmek yirmi yıldan fazla sürmüştü ancak 2000'lerin ortalarında Britanyalı fizikçi Roger Penrose tarafından geliştirilmiş olan, karmaşık sayılar kullanılarak zaman ve mekânı farklı bir tür uzayda haritalamanın bir yolu olan "twistor" adlı matematiksel araç kullanılarak giderek artan sayıda kestirme yol keşfedilmişti ancak bu aşamada neden işe yaradıklarını kimse bilmiyordu.

Kısa süre önce bu kestirme yolların, Grassmann pozitifi adlı gösterişli bir isme sahip bir kavrama dayanmakta olduğu keşfedilmişti. Bu bir üçgenin içinin çok boyutlu bir versiyonunun 19. yüzyılda geliştirilmiş olan matematiğiydi. Üçgenin içerisinde iki boyut kullanırız ve içerdeki mekân, kesişen doğrularla sınırlanmıştır. Daha genel olan Grassmann pozitifi çok boyutludur, mekânın kesişen düzlemlerle sınırlanmasıyla ortaya çıkar. Ve parçacık etkileşimleri için bir Grassmann pozitifinde saçılma sürecini tanımlamak için gerekli olan parçacıkların sayısına eşit sayıda boyut mevcuttur.

Feynman diyagramlarının geleneksel rolü olan, (parçacıkların nasıl etkileşime girdiğini tanımlayan) saçılma büyüklüğünün hesaplanmasına giden yolun son kısmı, "amplituhedron" adı verilen yeni bir nesne yaratmaktır. Bu, hacmi yayılan genişliğe eşit olduğundan, yapısının içinde çözüm kodlanmış tek bir nesne üretmek için Grassmann yapılarını bir araya getiren, "fiziğin mücevheri" olarak tanımlanmış olan bir yapıdır. Mesela sekiz gluonluk etkileşim için geçerli olan bir amplituhedron, birkaç doğruyla çizilebilir ancak 500 sayfalık

hesaplamaya eşdeğerdir. 2013'te geliştirilen bu kuram hâlâ emekleme aşamasındadır. Tek bir amplituhedron yüzlerce sayfa hesaplamaya karşılık gelebilir ve geleneksel Feynman diyagramı hesaplamaları kullanılarak erişilebilir olmayan değerlere ulaşmak için bir yol sağlarlar.

BÖLÜM 5
IŞIK VE SİHİR

KED'in içyüzünü kavradıktan sonra, ışık ile madde arasındaki her etkileşim bir kuantum meselesi haline gelir.

Işık olsun

Mütevazı ampulü düşünün. Ampulü icat etmiş olan Thomas Edison ve Joseph Swan aslında ışığın nereden geldiğini umursamıyordu, yalnızca tehlikeli gaz alevi ışığının yerini alabilecek, işe yarar bir ürün istiyorlardı. Newcastle upon Tyne'da çalışan Swan (şaşırtıcı bir şekilde Brian Blessed'e benzer) bu ürünü daha önce, 1879'da icat etti, ancak daha uyanık olan Edison patentlerin gücünün farkındaydı ve kendi patentini alır almaz Swan'ı patent ihlali yaptığı gerekçesiyle mahkemeye verdi.

Buluşlar tarihi çok parası olanın davayı da kazandığı vakalarla doludur, ancak bu sefer mahkemeler Swan'ın üstünlük iddiasının geçerliliğini fark etti ve Edison'un aleyhine karar verdi. Hükmün bir parçası olarak Edison, Swan'ın rakibinden önce işleyen bir ampul icat etmiş olduğunu kabul etti ve gönülsüzce Edison and Swan United Electric Light Company ismine razı oldu. Edison'un katkısı önemsiz değil-

di, hem bağımsız olarak bir karbon filamentine dayanan bir ampul geliştirdi, hem de Swan'ın yaptığı ürüne göre çok daha uzun yanmasını sağladı, ancak çoğu kişinin elektrik ampulünün mucidi olarak Edison'u anması bir miktar haksızlık gibi geliyor.

İddialar ne olursa olsun (Westinghouse'un büyük Nikola Tesla tarafından tasarlanmış olan alternatif akım sistemine karşı Edison'un kendi doğru akım kaynağının yararlarını öne sürmeye çalışırken Westinghouse ile yaşayacağı uzun savaştan hiç bahsetmeyelim) Edison'un aslında ilgilendiği tek şey, sıcak bir filamenti yanıp kül olmadan uzun süre koruyabilmekti. Yine de bu icadın arkasındaki süreç, her karmaşık elektronik cihazda bulacağımız kuantum sürecinin aynısıydı: Daha alt seviyeye inerken enerji emmiş olan elektronların foton yayma süreciydi.

Pencere bulmacası

Edison ve Swan'ın zamanında akkor halindeki ışığın anlaşılamayan bir tarafı yoktu, ancak ışığın fotonlar halinde yol aldığı öğrenildikten sonra, KED'in Isaac Newton'u şaşkınlığa uğratmış olan bir etkiyi açıklamak için gerekli olduğu ortaya çıktı. Bu etki kısmi yansıma idi. Bunun en basit örneği pencere camında görülebilir. Bir cam parçası ona çarpan ışığın bir bölümünü geçirir, ancak bir bölümünü de geri yansıtır. Cam vitrini olan bir dükkânın önünde dikilirseniz genellikle hem vitrinin diğer tarafını, hem de camda kendi yansımanızı görürsünüz. Işık hem camdan geçer, hem de camdan yansır. Özellikle de sizden gelen ışık yansır ve böylece yansımanızı görebilirsiniz. Ancak dükkânın içindekiler de camdan sizi görebilir, yani sizden gelmekte olan ışığın bir kısmı içeri geçmektedir.

Newton ışığın parçacıklardan ya da kendi deyimiyle korpüsküllerden oluştuğunu düşündüğünden bu, ona gerçek bir dert olmuştu. Eğer ışık dalgaysa dalganın bir kısmının camdan geçtiğini ve bir kısmının yansıdığını düşünebilirsiniz. Ancak fotonlar gibi parçacıklar bu şekilde ikiye ayrılmaz. Parçacığın tümü ya yansır ya da geçip gider. Newton'un cevaplayamamış olduğu soru da belirli bir parçacığın geçmeye veya yansımaya nasıl "karar vereceği" idi. Fark neydi? Çünkü bazıları geçiyor, bazıları yansıyordu.

Açık bir varsayım, bunun camın yüzeyiyle ilgisi olması gerektiğidir. Yüzey belki de bazı yerlerde daha pürüzlü ve daha aşınmıştır. Nihayetinde Newton'un zamanında cam özdeş olmaktan çok uzaktı. Ancak Newton "camı cilalayabileceğini" söyleyerek bu fikri bir kenara atabilirdi. Newton optik cihazlar yapmak için çok zaman harcamıştı, bu da mercek ve aynaların yüzeylerini cilalamak anlamına gelmekteydi. Yüzeyi cilalarken aşınmaları giderek daha da küçülttü, yüzeyi değiştirdi ve yüzeydeki eşitsizliklerden kaynaklanacak olan yansıma olasılığını düşürdü. Ancak cam yine de yansıtmaya devam ediyordu.

Bu kısmi yansıma faydalı bir şeydir. Teknik olarak bir foton demetini bu şekilde bölen bir cihaza bir demet bölücü adı verilir ve etki ara sıra rahatsız edici olsa da (yansıma mesela dizüstü bilgisayarınızın ekranında veya arabanızın ön camındaysa) optik deneylerde, arabaların göstergelerinde, çok hassas ölçümler yapmanıza olanak veren cihazlarda ve bazı fotoğraf makinelerinde ve hatta spot lambalarındaki özel reflektörlerde ekipmanın aşırı ısınmasına sebep olabilen kızılötesi miktarını düşürmek için kullanılmaktadır.

Bu demet bölünmesi tamamen bir kuantum etkisidir. Newton'un neden bazı korpüsküller (artık kendilerine foton diyo-

ruz) yansırken diğerlerinin geçip gittiği hakkında bir kural veya açıklama bulmak için beyin hücrelerini zorlamasının bir anlamı yoktu çünkü kuantum kuramının olasılıksal doğası haricinde seçimin bir sebebi *yoktur*. Örneğin bir fotonun belirli bir yüzeyden yansıma ihtimalinin yüzde 10 olduğunu söyleyebiliriz ancak sonuç ortaya çıkana dek ne yapacağını asla bilemeyiz.

Kalınlık önemlidir

Daha da tuhaf olan şey (eğer bir kuantum görüşüne sahip değilseniz) cam yüzeyinde meydana gelen yansımanın camın kalınlığına bağlı olmasıdır. Başka her şey aynı kalmak kaydıyla kalınlığı değiştirirseniz, yansıyan fotonların yüzdesi değişecektir. Bunun için dalganın tüm cam parçasından geçiyor olduğu şeklinde dalga temelli bir çeşit açıklama düşünebilirsiniz ancak fotonları küçük noktalara benzer parçacıklar halinde düşündüğünüzde bunu anlamak çok zordur. Yansıyıp yansımayacaklarına "karar verirlerken" cam parçasının kalınlığını nasıl bilebilirler?

Ne şanslıyız ki, kuantum parçacıkları hakkında, özellikle de bu parçacıkların olasılık dalgalarının zamana nasıl yayılmış oldukları hakkında artık daha fazla bilgiye sahibiz. Young yarıkları deneyinde tek bir fotonun olasılık dalgasının her iki yarığın varlığından etkilenebilmesi gibi, olasılık dalgası da camın tümünden geçer. Bunun anlamı, fotonun camın arkasından yansıyarak önüne geri gelme olasılığının mevcut olduğudur. Bu noktada, aynı Young yarıklarında olduğu gibi, fotonun önden ve arkadan yansıyan fazları, "saatlerinin" dönme şansının ne olduğuna bağlı olarak birleşecektir. Sadece bir foton bulunmaktadır ama her zaman olduğu gibi bu foton belli bir yerde değildir ve üzerinde çalışabileceğimiz

tek şey çeşitli olasılıklardır. Okların büyüklüklerinin karelerini karşılaştırarak meydana gelen gerçek yansıma olasılığına ulaşırız.

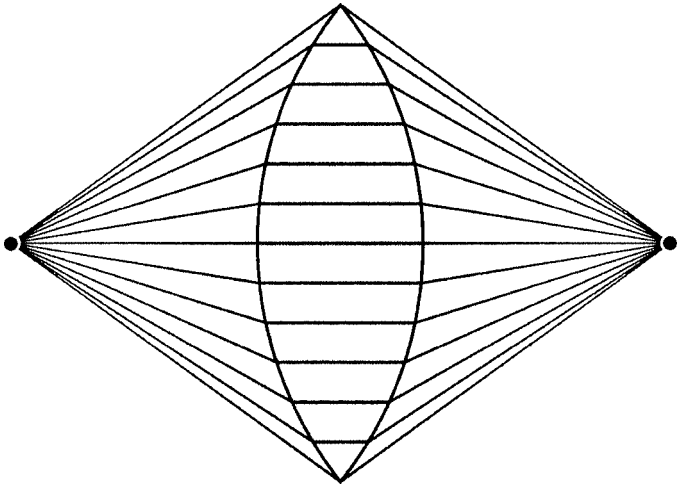
Camın kalınlığı arttıkça yansımanın miktarı önce azami dereceye ulaşır, daha sonra iki faz okunun birbirlerini sadeleştirdiği bir noktaya gelip pratikte hiçbir şey kalmayana kadar azalır. Camı daha da kalınlaştırdığımızda ise yansıyan kısım yeniden artmaya başlar, azami değere ulaşır ve daha sonra yeniden düşer. Gerçekte olup biten şey, fotonun cam içerisinde onu emecek ve dağıtma adı verilen bir süreçle yeni bir yönde tekrar yayacak olan her elektronla etkileşime girme şansı olduğudur. Ancak çeşitli olasılıklar ve faz okları öyle bir şekilde toplanır ve birbirlerini sadeleştirirler ki bu, foton camın ya önünden ya da arkasından yansıyormuş etkisini yaratır.

Bu etkinin, günlük hayatta dekoratif bir uygulaması vardır. Gökkuşağına benzer renkleri olan bir şey gördüğümüzde (mesela yerde ince bir yağ tabakasında gördüğünüz gökkuşağı renklerini düşünün) gerçekte olan şey, yağın kalınlığı farklı olan kısımlarında farklı renklerdeki ışığın fotonlarının yansıma olasılığının farklı olmasıdır. Kalınlık tabaka boyunca hafifçe değişirken farklı renklerin yansıdığını görürsünüz. Gökkuşağı renklerine sahip bir mücevher veya çanak çömlek parıltısı görürseniz, bilin ki burada bu heyecan verici kuantum etkisi meydana gelmektedir.

Kuantum hilesi

İş başındaki KED'e başka bir örnek gözlükler ve teleskoplarda her gün kullandığımız, fotoğraf makineleri ve gözlerimizin içine yerleştirilmiş olan lenslerdir. Lensin yaptığı şey, en kısa süre ilkesini atlatmasıdır. Bir fotonun bakıyor olduğunuz

bir şeyden (mesela bu sayfadan) gözünüzün retinasına giderken izleyebileceği sonsuz yoldan ikisine baktığınızı hayal edin. Olası yollardan biri nesneden retinaya doğrudan giden yoldur. Başka bir olasılık fotonun doğru çizgiden önce yukarı doğru sapması, daha sonra aniden yön değiştirmesi ve retinanızda aynı yere düşmek üzere geri dönmesidir.



Şekil 7. Lens: Daha kısa olan yol izlenirken camda daha fazla zaman geçirilir.

Fotonun en hızlı yol olduğundan düz çizgi üzerinde bulunması ihtimalinin çok daha yüksek olduğunu en kısa süre ilkesinden biliyoruz. Eğer yukarı giden yola ciddi bir sapma yapar ve daha sonra yönünü değiştirirse, bir diğer saatin faz oku tarafından kolayca sadeleştirilecektir. Ama şimdi yolun üzerine fotonları yavaşlatan bir çeşit sihirli materyal koyalım. Bu materyal düz yolun geçtiği yerde daha kalın, düz olmayan diğer yolun yön değiştirdiği yerlerde ise daha ince olsun. Bu şekilde, fotonun düz yolu aşması, daha uzun olan ve yön değiştiren yola göre daha uzun zaman alır.

Bu sihirli materyalin eklenmesinin doğurduğu sonuç, fotonun düz yolu artık yön değiştiren uzun yolla aynı sürede kat etmesidir. Foton her iki yolu da artık en kısa sürede alır ve böylece fotonların faz okları birbirlerine eklenir. Fotonun her iki yolu izleme ve aynı noktaya ulaşabilme olasılığı mevcuttur, yani ışığın çıkagelmesi olasılığını artırmış oluruz. Artık ışığı odaklamış olduk. Sadece en kısa süre ilkesini ve küçük faz oklarını kullanarak lensi sıfırdan icat ettik. Ve lenslerin her birinin (gözlerinizdeki lensler dahil) güçlü bir kuantum cihazı olduğunu gösterdik.

Işıktan beslenmek

KED sayesinde çalışan cihazları tek tek saymak mümkün değildir. KED'in her ışık türüne uygulanabileceği açıktır, ancak bir an güneş panelini göz önüne alın. Bölüm 2'de de görmüş olduğumuz gibi fotosentez, ışık ile madde arasındaki kuantum etkileşimine dayanan bir süreçtir ve bir tür kuantum katalizidir, ancak ışıktan elektrik üretmek için kullandığımız teknolojide kuantum etkisi daha bilinçli bir şekilde kullanılmaktadır.

Görmüş olduğumuz gibi, bir fotonun metaldeki bir elektronu iletken katmanına fırlattığı fotoelektrik etki, kuantum kuramının anahtar keşiflerinden birisidir. Ancak güneş panellerinde (PV veya fotovoltaik hücre olarak da adlandırılırlar) pratik olması için kullanılan materyal, elektronu yukarı itmenin elektron/delik çifti oluşturma etkisi üretmiş olduğu, silikon gibi bir yarıiletkendir. Hücreler bir diyot şeklinde yapılandırılmışlardır, böylece akım sadece bir yönden geçebilir ve faydalı olabilmek için yeterli elektrik enerjisi üretmek üzere büyük bir matriste bir araya gelir.

Geleneksel silikon temelli, tıknaz güneş hücre panellerinden bir film üzerine basılmış olanlara kadar çok çeşitli fotovoltaik hücre teknolojileri mevcuttur. Film üzerine basılanlar, geleneksel yapıdan çok daha ucuzdur, ancak aynı zamanda çok daha verimsizdirler, gelen enerjinin daha azını elektriğe çevirirler. Tipik bir güneş panelinin verimi yaklaşık yüzde 25 olup mevcut olan en iyi hücreler (ticari olarak pratik olmasa da) yüzde 50'ye yaklaşırlar. Buna karşın film hücrelerinin verimi yüzde 1 ila 2 kadar düşük olabilir ancak maliyetleri de çok düşük olacaktır.

2013'te güneş hücrelerinin müzik dinletildiğinde daha fazla elektrik ürettiklerine dair medyada bir hareketlenme olmuştu. Eğlenceli bir şekilde, hücrelerin pop müziği klasiğe tercih ettikleri ortaya çıkmıştı. Bu, film tarzı olan hücrelerin çinko oksit temelli olan bir varyasyonunda özellikle geçerliydi. Bu hücreler aşağı yukarı sadece yüzde 1,2 civarındaydı ancak içlerine sesle titreşen küçük oksit "kılları" yerleştirilerek verim neredeyse iki katına çıkarılabiliyordu. Yüksek frekanslarda daha fazla enerji üretilmekteydi, yani yüksek frekansa eğilimi daha fazla olan pop müzik yarışı kazanmaktaydı. Ancak üretimi artırmak için hoparlör bağlanmış güneş panellerinden oluşan tarlaların son hit parçaları bangır bangır çalması riski yoktur çünkü hücrelerdeki etkinliği artırabilmek için müzik çalınarak çok daha fazla enerji harcanır. Öte yandan bu teknoloji doğal olarak gürültülü bir ortamda, mesela bir havaalanında kullanışlı olabilir.

Hareketli kuantum yazıları...

Başka bir örnek, iş başındaki KED'in ufkunu göstermektedir. Bu kitabı nasıl okursanız okuyun, ışık ile madde arasındaki kuantum etkileşiminden faydalanırsınız. Okumakta olduğu-

nuz, büyük miktarda bilgiyi erişilebilir kılmak için kullanılan taşınabilir teknolojilerin en eskisi olan kâğıda basılmış bir kitap olabilir. Tüm biçimleriyle yazı belki de geliştirmiş olduğumuz en dönüştürücü teknolojidir. Günümüzde bilgiye başka yollardan (örneğin video izleyerek) ulaşmak mümkündür ama yine de ister elektronik cihazlarımızla ister daha geleneksel yöntemlerle olsun, bize yazılı şekilde ulaşan devasa miktarda bilgi mevcuttur.

İletişim tüm canlıların yaptığı bir etkinliktir, yazı da bu etkinliğin bir türüdür, ama doğal iletişimi kısıtlayan zaman ve mekân sınırlarını ortadan kaldırdığından çok özel bir yöntemdir. Kitaplığımda Eski Ahit'ten sorumlu olan tarihöncesi İsrailliler, Arşimet ve Aristo gibi Antik Yunan filozofları, ortaçağ *Anglo-Sakson Kronikleri*'nin yazıcıları, Galileo, Newton ve Brian Clegg tarafından yazılmış (çoğu çeviri olan) kitaplar bulunuyor. Muhtemelen kitaplarımın çoğu canlılardan çok ölülerle iletişim kurmamı sağlıyor (ve Terry Pratchett ile Brian Clegg hariç hayatta olanların hiçbiri evimin yakınlarında yaşamıyor).

Bilgisayarlar ve internet iletişimde yerellikten uzaklaşmayı daha da ileri boyuta taşıdı. Bugün dünyanın herhangi bir yerinden e-postalar alabiliyorsunuz. İnternet sayısız farklı zaman ve mekândan bilgi edinmenizi sağlıyor. Ve yazı, posta kutunuzu dolduran çok sayıda sinir bozucu gereksiz e-postadan daha fazlasını yapmanıza olanak veriyor. Yazılı belgeler olmadan bilimin temellerini atamazdık; evreni anlamamızın tek yolu, sözlü olarak aktarılan mitler olurdu. Fikirleri geleceğe ve uzağa aktarmak mümkün olmasa insan tekerleği (hem kelimesi kelimesine hem de metaforik olarak) sürekli yeniden icat etmek zorunda kalırdı. Tekerleği bir kez icat etmenin yeterli gelmesi bir KED teknolojisi olan yazıya bağlıdır.

Yıldızdan beyne

Geleneksel bir kitap sayfasında bulunan bilgiyi kâğıttan beyne almak oldukça basit gözüken bir süreçtir, ama yine de bu süreç güçlü bir kuantum olaylar zinciri içerir. Bu kitabı gün ışığında okuduğunuzu hayal edin. Milyonlarca yıl önce, Güneş'in derinliklerindeki nükleer tepkimeler yüksek enerjili fotonlar salmıştı. Geçen yıllar boyunca, bunlar sürekli emilerek ve yeni fotonlar saçılarak yıldızın yoğun yapısı boyunca dışarı doğru yol aldılar. Nihayetinde Güneş'in 5500°C'ye kadar ısınan yüzeyine ulaştılar, beyaz bir ışıkla parlayarak saniyede milyarlarca foton saçtılar.

Bu fotonlar Dünya'nın atmosferine ulaşmadan önce uzayı sorunsuz bir şekilde aşarlar. Burada havadaki gaz molekülleri (birincil olarak azot ve oksijen) tarafından dağıtılacak, emilecek ve yeniden başka yönlere saçılacaklardır. Yüksek enerjili fotonların saçılma olasılığı daha yüksektir, yani Güneş'in etrafında gördüğümüz saçılmayan fotonlar daha düşük enerjili olan sarı renkteyken saçılan mavi fotonlar gökyüzüne rengini verirler. Kitabınızın sayfasına doğrudan gelen ve saçılan fotonların karışımı beyaz bir ışık üretir. Fotonlar kitabın ve mürekkebin atomları tarafından emilir ve elektronları daha yüksek enerjili bir yörüngeye taşıyarak atomların enerji seviyesini artırır. Siyah mürekkepte bu enerjinin büyük kısmı molekülleri ısıtmaya gidecektir ancak beyaz kâğıtta fotonların çok daha fazlası, gözlerinize doğru tekrar saçılacaklardır.

Fotonların yolları gözdeki lens tarafından şekillendirilir, KED'in kurallarına göre emilir ve tekrar saçılırken iş gören daha fazla kuantum süreci de mevcuttur. Fotonlar retinaya ulaşana kadar, gözün içindeki jöle benzeri maddeden geçerken emilim ve tekrar yayılım olacaktır. Burada fotonlar bir fotoreseptör molekülleri koleksiyonu içeren özel hücrelere çarparlar. Bu hücrelerce emilen fotonlar görme sinirine doğru

yaptıkları yolculukta bir elektron koleksiyonu oluştururlar ve sonunda beyne ulaşırlar, burada da karışık sinyaller iletişim aracı olarak yorumlanabilecek görsel imgelere ve kâğıt üzerindeki tuhaf işaretlere dönüştürülür.

Elektronik kelime

Geleneksel kitaptan bu kadar söz etmek yeter. Bu kitabı bir e-okuyucuda okuyor olma ihtimaliniz giderek artıyor. Yazmaya ilk başladığımda e-kitap diye bir şey yoktu, bugünse satılan kitaplarımın üçte birinden daha fazlası e-kitap ve bu oran giderek yükseliyor. Bu e-okuyucuların çoğu konvansiyonel bir LED ekran (*bkz.* sayfa 76) kullanan bir bilgisayar veya bir tablette çalışan yazılımlardır. Mesela e-kitapları genellikle bir iPad ile okurum. Ancak Kindle veya Nook gibi bu işe adanmış olan e-okuyucular, e-mürekkep kullanırlar.

Bu pasif bir görsel teknolojidir. Bir LCD ekran gözünüze doğru foton pompalarken e-mürekkep kullanan bir okuyucu kâğıt bir sayfa gibi öylesine orada durur ve Güneş veya başka bir ışık kaynağından gelen fotonların mesajı beyninize iletmesini bekler. E-mürekkep kullanan cihazlar, ekranlarının yenilenme hızı LCD'ye göre çok daha yavaş ve grafik becerileri çok daha sınırlı olsa da iki büyük avantaja sahiptir: Görüntüyü yerinde tutmak için enerji kullanmazlar, sadece görüntüyü meydana getirmek için enerji harcarlar ve ışığı daha az yansıtacak şekilde üretilebilirler ki bu da onları doğal ışık altında kullanım için ideal cihaz haline getirir.

Tipik bir e-mürekkep ekranında, içinde düz parlak titanyum dioksit parçacıklarının bulunduğu yağ içeren ince bir katman kullanılır. Görüntüyü meydan getiren pikseller, üstteki bir çift saydam elektrot ile kontrol edilir. Elektrot beyaz parçacıkları yukarıda toplamak üzere yüklendiğinde piksel

beyazı gösterir, ancak parçacıklar dipteki elektroda çekildiklerinde aşağı düşerler. Kullanılan teknolojiye bağlı olarak yağ içerisinde ya siyah bir pigment mevuttur ya da beyazın tersi yüke sahip olan ve yukarı sürüklenen bir dizi siyah parçacık bulunur. İnce bir film üzerinde, "aktif bir matris" oluşturacak şekilde her bir piksele karşılık gelen bir transistör ve kapasitör mevcuttur, pikselin aktif bir şekilde doğru değere sahip olduğundan emin olunması için LCD'lerin çoğunda da aynı adresleme teknolojisi kullanılır.

Özel bir ışın

Elektrik ışığından elektronik kâğıda, kuantum optik teknolojilerinin olasılıkları sınırsızdır. Ve bu cihazlar günümüze kadar tüm fotonların eşit olduğu varsayımıyla foton ile madde arasındaki basit etkileşime bel bağlamıştır. Ancak 1950'lerde yapılan bir keşif, bu fotonlardan çok özel bir şekilde faydalanarak ışık üretmeyi mümkün kılacaktı. Elektroniğin, kuantum kuramını kullanarak elektriği kontrol etme şeklimizi dönüştürmesi gibi bu yeni teknoloji de, daha önce hiç görülmemiş bir ışık türü üretmek için fotonların kuantum doğasıyla ilgili kesin bir bilgiden faydalanmaktadır.

Bu, müzik dinlemek, ameliyat yapmak ve hatta öldürmek için kullanılabilecek bir ışıktır.

BÖLÜM 6

SÜPER IŞINLAR

1973 yılının soğuk kış aylarında on yedi yaşındaki iki çocuk hiç ses seda etmeden okullarında kullanılmayan odalardan birine çekilmişti. Ergen oğlan çocuklarından beklenecek şekilde kapıya "Girilmez! Ölüm tehlikesi! Son derece yüksek gerilim!" gibi uyarılar koymuşlardı ama pek çok ergenin odalarının kapısına astığı uyarı işaretlerinin aksine bunlar sadece gösteriş amaçlı değildi. Bu ikili, gerçekten de öldürme potansiyeli olan bir teknolojiyle uğraşmaktaydı.

Işık okulu

On yedi yaşındaki bu gençlerden biri de bendim. Okulum, Oxbridge adayı olacak öğrencilerini bitirme sınavlarına bir yıl önceden girmeleri için cesaretlendirmiş, üniversiteye giriş sınavlarına yoğunlaşmamız için bizi okuldaki son yılımızda serbest bırakmıştı. Ancak bu sınavlara ilk dönemin sonunda giriliyordu. Eğer okul bizi, akademik yılın sonuna kadar okulda kalmamız için ikna edebilirse, hükümetten çok daha fazla para alabiliyordu. Böylece programa her türlü ilginç dersi koyarak (ve fen öğrencilerini zor bir projeye başlamaya

teşvik ederek) bizi kalmamız için ayarttılar. Arkadaşım David Ball ve ben bir lazer yapmaya karar vermiştik.

İlk bakışta bu kesinlikle zor bir işti. Nihayetinde dünyanın ilk lazerinin yapılmasının üzerinden on yıldan pek de fazla süre geçmemişti. Ancak 1970'te *Scientific American*'da yayınlanmış olan ve okuyuculara bir boya lazeri inşa etmek hakkında kılavuzluk eden ayrıntılı talimatları izliyorduk. Başaramadık. Sonunda zamanımız yetmedi. Cihazımız hiç çalışmadı. Ancak bilimsel ekipman inşa etmek konusunda mükemmel bir tecrübe edindik. Birisi yarı yarıya yaldızlı ve hassas bir şekilde ayarlanmış olan metal ayaklara asılmış aynaları olan boya çemberini inşa etmiştik. Kalan gazı bir çift devasa kapasitör çıkışıyla bir hava pompasına bağlayarak kısmen tahliye eden kalın, saydam bir tüpe dolduran çok güçlü elektronik bir flaş lambası inşa etmiştik. Aynaları bile hizalamıştık ki başarılı bir lazer inşa etmenin en alengirli işlerinden birisidir (ancak hizalama aşamasında kılavuz olarak hazır bir lazer kullanmak suretiyle hile yapmış olduğumuzu itiraf etmeliyim).

Sıfırdan inşa etmiş olduğumuz elektronik flaş lambasını çalıştırabilmiştik. Flaşlarımız son derecede heyecan verici olup bize, mekân içindeki aydınlatmanın üstadı olduğumuz hissini vermişti ve Manchester Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nden ödünç aldığımız, her biri bir yağ tenekesi büyüklüğündeki kocaman gri kapasitörler çok işe yaramıştı. Öyle büyük elektrik yükleri oluşturuyorlardı ki uçlarına dokunduğunuz anda ölebilirdiniz. (Bugünlerde okulların iki öğrencinin denetimsiz şekilde bu kadar tehlikeli bir teknolojiyle oynamasına izin verebileceğini sanmıyorum.) Ancak lazerin kendisini çalışacak hale getirebilir miydik, bilemiyorum. En meşhur kuantum cihazı olan lazerin tarihini araştırdığınızda göreceğiniz gibi, cihazı çalıştırmak, bu alanda çalışan ilk bilimciler için önemsiz bir iş değildi.

Rus amplifikatörü

Lazerin gelişiminin dolambaçlı hikâyesinin başlangıç noktalarından biri, 1954 Ekim'inde Rusya'da başlamıştı. Alexander Prochorov ve Nikolai Basov, Rusça yayınlanan *Deneysel ve Kuramsal Fizik Dergisi*'ne genel görelilik ile kafayı bozmadan önce Einstein'ın 1916'da yapmış olduğu bir tahmine dayanan, henüz kuramsal olan bir süreci tanımlayan bir makale verdiler. Ruslar Einstein'ın tanımlamış olduğu süreci kullanarak uygun bir materyalin mikrodalgalar (görünür ışıktan daha düşük enerjili fotonlar) için amplifikatör olarak iş göreceğine ve daha güçlü bir ışın üretmek için fotonlardan oluşan zayıf akışı kat kat artıracağına inanıyorlardı. Bu süreç daha sonra, "uyarılmış ışınım salımı yoluyla mikrodalga amplifikasyonu" olarak bilinecek, kuramsal cihazın kısa ismi "mazer" olacaktı.

Einstein'ın fark etmiş olduğu şey, bir elektrona doğru dalga boyunda (Basov ve Prochorov'un deneyinde mikrodalga bölgesinde) ışık isabet ettiğinde elektronun fotonun enerjisini emerek silahın kalkan horozu gibi yarı kararlı bir halde bekleyebileceğiydi. Eğer aynı elektron hâlâ bu haldeyken ona ikinci bir foton isabet ederse elektron iki foton yayacak ve foton, elektronun aşağı doğru attığı iki adımı tetikleyeceğinden gelen ışığı artıracaktı. Eğer bunlar, fotonların elektronlara çarpa çarpa ortamdan geçmeye devam ettikleri yansıtıcı bir odada gerçekleşiyorsa sonuç, süreç tarafından KED faz oklarının hepsi aynı yöne bakacak ve birlikte hareket edecek şekilde senkronize olmuş bir foton akışı üreten zincirleme bir tepkimeyle elektronları yüksek enerjili bir halden aşağı düşmeye hazır bir atom grubu meydana getirmek olurdu.

Einstein için bu, ilginç bir kuram olmanın ötesine geçebilecek bir şey değildi ancak 1930'larda, Rus bilimadamı Valentin Fabrikant, hayal gücünde olayları daha da ileriye götürdü.

Atomlarının çoğu, normal durumun tersine, uyarılmış halde bulunan bir materyaliniz olursa neler olacağını merak etmekteydi. Eğer aynı enerjiye sahip olan fotonları bu materyalden geçirirseniz bu, kitle halinde bir salımı tetikleyip orijinal ışığı (ister görünür, ister o zamanlarda belki de daha kullanışlı olan radyo veya radar mikrodalgaları) çok daha kuvvetli bir ışın haline getirmeliydi. Prochorov ve Basov'un makalelerinde tanımlamış oldukları kavram bu kavramdı. Prochorov 1955'te Cambridge'de Faraday Cemiyeti tarafından organize edilen bir konferansta amonyak gazı ile yine bu kavramı tanımladı. Bu kavram, izleyicilerden birini sersemletmişti.

O benim mazerim

Bu kişinin adı Charles Townes'dı ve yaşadığı şokun sebebi, kendisinin zaten bir amonyak mazeri inşa etmiş olmasıydı. Demir Perde yüzünden Batılıların kolayca ulaşamadığı bir dergide çıkan makaleden haberi olmayan Townes, mazerler üzerinde çalışan (ve kesinlikle cihazı inşa eden) ilk kişi olduğuna inanıyordu. Ancak 1955 Ağustos'una kadar mazer üzerindeki çalışmasının ayrıntılarını yayınlamamış ve Prochorov ile Basov'a kuramda önceliği teslim etmişti. Townes İkinci Dünya Savaşı esnasında bir Bell Laboratuvarları radar projesi için mikrodalgalar üzerinde çalışmıştı. Omzu kalabalıklar her geçen gün daha ayrıntılı radar okumaları istiyorlardı, bu da 24 gigahertze kadar çıkan gitgide daha yüksek frekanslı mikrodalgaların (saniyede 24.000.000.000 defa salınım yapan dalgalar) kullanılması anlamına geliyordu. Gaz halindeki amonyağın bu civarda bir frekansa sahip ışıkla kolayca uyarılabileceğini gösteren çalışmaları takip eden Townes, bu kadar hassas bir radar üretmenin yolunu bulduğunu umuyordu, ancak havadaki su buharının bu frekansı hızla emerek radar

için kullanılamaz hale getirdiğini keşfedecekti. Havanın kaçınılmaz bir bileşeninin çalışmasını engelleyeceği bir radar sistemi geliştirmenin bir anlamı yoktu.

Townes savaştan sonra Columbia Üniversitesi'nde bir profesörlük aldı ve bu yüksek frekanslı mikrodalgaların amonyak gibi moleküllerle etkileşimi üzerine çalışmalarına devam etti. Arthur Schawlow adındaki bir doktora sonrası öğrenciyle çalışan Townes, ilk olarak çok yüksek frekanslı bir kaynak gerektirecek şekilde ekstra rotasyon enerjisi verilerek uyarılan amonyak molekülleriyle çalışmayı düşündü ancak daha sonra 24 gigahertz civarındaki mikrodalgaların ideal olacağı daha geleneksel vibrasyon uyarılması ile çalışmaya karar verdi. (Uyarılma temel olarak elektronları daha üst enerji seviyelerine taşımakla ilgilidir ancak bu bir molekülde meydana geldiğinde, bileşen atomlarından birinin enerjisindeki değişim sebebiyle belirli dereceye kadar enerji içeren bir rotasyon veya vibrasyon ile sonuçlanabilir.) 1954 baharında artık Jim Gordon ile çalışmakta olan Townes, mazer adını verdikleri çalışan bir modele ulaştı ve tam bunu dünyaya duyurmaya hazırlanırken Cambridge'de Prochorov'un çalışmasını keşfederek bir şok yaşadı.

Her bilimsel keşfin hikâyesi, tüm olanaksızlıklara karşı mücadele veren ve daha önce kimsenin aklına gelmeyen bir sonuç üreten bir birey veya ekibin hikâyesi olsa, bu hoş bir şey olurdu, ama bilimsel bir gelişmeye genellikle pek çok kişi ya da grup katkı yapar (yukarıdaki buluş öyküsünü anlatırken küçük atılımları ihmal ettim bile) ve birbirinden tamamen bağımsız iki veya daha fazla ekibin yaklaşık olarak aynı zamanda aynı sonuçlara ulaşması alışılmamış bir şey değildir. Bu vakada ayrım oldukça belirgindir. Prochorov kuramını daha önce yayınlamıştır (ve birinci olma iddiası için yayın gereklidir), ama çalışan cihazı ilk geliştiren Townes'dur. Ancak kısa

süre içerisinde mazerin çok daha başarılı olan halefiyle ilgili daha çirkin bir tartışma çıkacak, öncelikler bugün bile açık ve net bir şekilde belirlenemeden kalacaktı.

Işık için bir mazer

Mazer etkileyici bir cihazdı ve amonyak mazeri, Townes'un ummuş olduğu mucizevi hassasiyeti üretmemiş olsa da radyasyonunun frekansındaki eşi benzeri olmayan hassasiyet, atomik saatlerin tasarımının geliştirilmesi üzerinde derhal bir etki yaptı. Ancak kavramın, görünür ışığa uygulandığında çok daha heyecan verici bir potansiyeli olduğu hemen fark edildi. Görülür bir mazer yapma yarışı başladı ve bu yarışta Amerikalı fizikçiler Art Schawlow ile Gordon Gould, kavramı ilk kimin geliştirmiş olduğu konusunda acımasız bir patent savaşına gireceklerdi.

Görülür ışık ile çalışan bir mazer yapmak için uğraşanlar sadece Schawlow ve Gould değildi. Ali Javan, Donald Herriott, John Sanders, Herbert Cummins, Isaac Abella, Geoffrey Garrett, Paul Rabinowicz, Steve Jacobs, Irwin Wieder, Peter Sorokin, Wolfgang Keiser, Mirek Stevenson, Ron Martin, Valentin Fabrikant, Fatima Butayeva, Charles Asawa, Ben Senitzky, Elias Snitzer ve William Bennett dahil diğerleri de, alandaki üç esas oyuncu için faydalı olduğu sonradan ortaya çıkan adımlar atmışlardı. Okur bu kişilerin kim olduğunu bilmese de, sonuca ilkönce ulaşmak için pek çok kişinin dünyanın dört bir yanında üniversiteler ile şirketlerde hummalı çalışmalar yürüttüğü izlenimini edinmiş olmalıdır.

Kitapta görmüş olduğumuz başka bir isim, doğrudan Schawlow ile çalışmakta olan Charles Townes'un kendisiydi. Mevcut mazer teknolojisini daha da yüksek mikrodalga frekanslarına taşımanın zorluklarını keşfettikten sonra, elekt-

romanyetik spektrumda epey ileriye kaymanın daha kolay olabileceğini düşünerek kendisi zihinsel bir sıçrama yaptı. 1957'de bundan sonra "optik mazer" olarak anacağı bir şeyi düşünmeye başladı. İsim kulağa biraz acemice gelebilir, ancak mazer onun çocuğuydu ve gelecekteki tüm gelişmelerin köklerine ve cihazına açık bir şekilde bağlanmasından emin olmak istiyordu. Townes, mikrodalga iletimini geliştirmek amacıyla gaz moleküllerindeki elektronları daha yüksek bir seviyeye itmek için çeşitli frekanslardaki ışığı kullanmayı sağlayan optik pompa adlı bir fikir geliştirmişti. Townes bu tekniğin, bir optik mazerin zincirleme tepkisini başlatmak için kullanılabileceğini hissediyordu.

Bell keşifleri

O yıl Townes daha sonra Columbia Üniversitesi'nden, kayınbiraderi Schawlow ile birlikte çalışarak lazer yarışının ekiplerinden birini oluşturacağı, AT&T'nin Bell Laboratuvarlarına geçmişti. Bell'in büyüklüğü artık solgun bir hatıradır, ancak şirketin ABD iletişim pazarındaki neredeyse eksiksiz tekeli, temel araştırma ve geliştirmeye devasa miktarda kaynak ayırabileceğini göstermekteydi. Buranın mazerin optik halefi üzerinde çalışmak için ideal yer olduğu söylenebilirdi. Nihayetinde bundan sadece bir yıl önce transistör üzerindeki çalışmalarıyla bir Nobel Ödülü kazanmış olanlar, Bell'deki bilim insanlarıydı.

Townes-Schawlow ekibi çalışmalarına, emisyon yapmak üzere uyarılacak madde olarak buhar halindeki çeşitli metallerin potansiyelini inceleyerek dikkatli ve aşamalı bir şekilde başladı. Bunlar, gerekli olan uyarılmış duruma geçebilmek için iyi adaylar olduklarından başlangıçta ilgi çekici gözüküyorlardı, ancak metal buharlarıyla uğraşmak, beklenenden

daha meşakkatli çıktı. Ekip uyarılmış emisyonun yer alması için bir çeşit oda da tasarlamak zorundaydı. Mazerdeki mikrodalgaların kaçmasına izin vermek için mikrodalga dalga boyu civarında (birkaç santimetre) delikleri olan dikdörtgen şeklinde basit metal kutular yeterliydi. Ancak çok daha kısa olan dalga boyuyla görünür ışığın uygun bir şekilde nasıl sınırlanacağını bulmak zordu. Işığı metal bir kutuda depolayamazsınız.

İlk lazerlerde aşağı yukarı evrensel olacak olan çözümü bulan kişi, Art Schawlow oldu. Kenarları, ortamı uyaracak olan ışığın girmesine izin verecek şekilde açık olan ve her iki tarafında da, yayılan ışığın yansıtıcı yüzeyler arasında gidip gelerek içerdeki ortamı sürekli olarak tekrar uyarması için aynalar bulunan bir oda olan bir Fabry-Perot boşluğu kullanmayı önerdi. Birbirlerine paralel olmaları, aralarında birkaç dalga boyu mesafe olması ve yansıtıcılık seviyelerinin yüksek olması şartıyla aynalar mükemmel bir odanın temelini oluşturabilirlerdi.

Bir lazer mücevheri

Bu ana kadar optik mazerler için geliştirilen fikirlerin tümü, uyarılan emisyonlar üretmek için materyal olarak (metalik veya diğer) gazlara odaklanmıştı, ancak Bell Laboratuvarları'nın transistör ile ulaşmış olduğu başarı, katı hali göz önüne almanın önemini hatırlatmaktaydı. Schawlow gazın yerine saydam bir çeşit katı kullanmanın yolunu aramaya başladı. Mazerlerde sentetik yakutlar zaten kullanılmaktaydı, yani bu belirgin bir başlangıç noktasıydı. Bell'de hâkim olan sistematik bilimsel bakış açısı ile bunun anlamı, o zamanlarda tam olarak anlaşılamamış bir süreç olan, yakut üretmek için alüminyum okside eklenen krom atomlarının farklı uyarım hal-

lerini araştırmak anlamına geliyordu. Kayda değer bir çaba harcandıktan sonra yakutlar bir kenara atıldı. Yeterli miktarda krom atomunu tetiklenmeye hazır uyarılmış bir hale getirmek zordu ve ekibin çalışması, yakutların etkili bir stimüle emisyon tepkimesi elde etmek için ışık enerjisinin çok fazlasını emerek ısı olarak harcayacağını göstermekteydi.

1958'in sonlarında Townes ve Schawlow, *Physical Review Letters*'da optik mazer kavramlarının altını çizen bir makale yayınlamışlardı ve optik mazerlerin pratik bir kullanımı olacağına inanmakta zorlanan Bell Patent Ofisi'nin bir süre yakınmasının ardından iletişimde optik mazerlerin kullanımının patentini aldılar. Bell Laboratuvarları, uzmanlık alanları olduğundan neredeyse kaçınılmaz olarak dünyaya iletişim penceresinden bakmaktaydı. Optik mazerler üzerinde çalışan bilim insanları, tam da optik bölgeyi kullanarak dar bir frekans aralığında ışık üretebildiğiniz sürece bir "boru" içinde çok daha fazla sinyal sıkıştırabileceğiniz anlamına gelmesinden ötürü bunu heyecanlı bir gelişme olarak görüyorlardı. Bell'e sorarsanız kendi bilim insanları yarışta açık farkla öndeydi ancak mevcut olan rekabetten haberleri yoktu.

Gould standardı

Townes, Columbia'dayken Gordon Gould adlı bir yüksek lisans öğrencisinden yardım istemişti. Optik pompa ve belirli bir lamba türünün kullanımı hakkında konuşmuşlardı. Ancak Gould'un aklında bir mazerin optik bir versiyonu zaten mevcuttu ve Townes ile konuşması, onu harekete geçirmişti. Çok farklı karakterlere sahiplerdi: Townes daha tutucu, katı, düzenli biriydi; dönem dönem çılgınca çalışıp daha sonra günlerce iş çıkaramayan Gould ise daha devrimciydi. Kusur-

suz bir geçmişi olan Townes'un aksine Gould Marksizm ile ilgilenmişti. Bu gençlik hevesi onun karşısına daha sonra sorun olarak çıkacaktı.

Gould, ışığın uyarıma yol açarak bir ortamdan tekrar tekrar geçişini sağlamak için paralel aynalar kullanımı fikrine bağımsız olarak ulaşmıştı ve Townes'un optik mazeri düşük güçlü mikrodalga cihazının sadece bir varyasyonu olarak görmesine rağmen Gould, ortamdan geçiş üzerine geçişin giderek daha fazla uyarım üretmesi ve nihayetinde son derece yoğunlaşmış bir ışın demeti üretmesinin potansiyelinin farkındaydı. Güneş'in yüzeyindeki kadar (yaklaşık 5.500°C) yüksek sıcaklıklar üretebilecek veya Güneş'in içerisindeki devasa sıcaklıklar ve basınçlarda olduğu gibi atomların çekirdeklerini birleşene kadar sıkıştırabilecek bir ışın üretilebileceğine inanıyordu.

Lazerin adlandırılışı

1957 yılının kasım ayıydı. Gould, bu kadar rekabetçi bir çevrede önceliği sağlamış olmanın önemini biliyordu. Bir patent için kanıt olarak kullanılabilecek şekilde dikkatlice notlar tutarak "optik mazer"in yerini alacak yeni bir terim üretti. Gould notlarına şu başlığı koydu: "LAZER'in (Uyarılmış Işınım Salımı ile Işık Güçlendirme [LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation]) Elverişliliği Hakkında Bazı Kabataslak Hesaplamalar." Normalde bu belgeyi bir meslektaşa imzalatmak gerekirdi, ancak Gould Columbia'da rakiplerinin olduğunun farkındaydı. Önceliğini kaybetmekten korkarak defterini (tesadüf eseri kendisiyle aynı soyadını taşıyan) bir notere götürdü. Noter, fikre ne zaman ulaşmış olduğunu belirlemek için Gould'un sayfalarına tarih atarak kaşe vurdu.

İlkesel olarak Gould Townes'dan birkaç ay önce patent başvurusunu yapmaya hazırdı ama bu aşamada önemli bir hata yaptı. Ebeveynleri 1958 Ocak ayında onu bir patent avukatıyla tanıştırmıştı ancak Gould bu buluşmadan, hatalı bir şekilde, patent alabilmesi için çalışan bir modele ihtiyaç duyduğu fikriyle ayrılmıştı. (Bariz sebeplerden ötürü devridaim makineleri için çalışan modellere ihtiyaç vardır oysa patent için genellikle sadece evraklar yeterli olur). Gould savunma projelerinde uzmanlaşmış olan Technical Research Group (TRG) adlı bir şirketle kısa süre çalışmıştı. Şimdi burada atomik saatler üzerinde çalışacağı bir iş bulmuştu ve öğle yemeği molaları ile akşamlarını lazer projesi üzerinde çalışarak geçirmeyi umuyordu.

Gould başlangıçta bunu gizlemişti ancak kısa süre sonra, TRG için çalıştığı esnada yaptığı keşiflerin patent hakkından feragat ettiğini gösteren bir belge imzalamak zorunda kalmıştı. Mevcut olan bir fikrinin bu feragatin haricinde tutulmasına ihtiyacı olduğunu açıkladı. Şirket bunu kabul etti ve bu fikir hakkında daha çok şey öğrenmek istedi. Başlangıçta lazerin değerinden şüpheleniyorlardı ancak Gould lazeri hevesle savundu ve şirketi ikna etmeyi başardı. TRG'nin kurucusu olan Lawrence Goldmuntz, bir lazer inşa etmenin Pentagon'dan destek alabilecek bir proje olduğunu ve Gould patent haklarını korurken büyük parasal destekler alabileceklerini öne sürdü. Gould olasılıkları art arda sıralayarak ışık demetinin yoğunlaştırılmış enerjisi ile ta Mars'a kadar yoğun iletişim ışınları gönderebilecek veya metalde delikler açabilecek bir cihazdan bahsediyordu. Townes ve Schawlow'un makalesinin yayınlanmasından bir gün sonra, 16 Aralık 1958'de TRG'nin 300.000 dolarlık yüksek bir kaynak isteyen teklifi Pentagon'a gitti.

Askeri güç

Geleneksel ABD ordusunu bu ana kadar son teknoloji ile etkileyebilmek zor olmuştu, ancak bu teklif uygun bir zamana denk gelmişti. Sovyetlerin insan yapımı ilk uydu olan Sputnik'i fırlatarak teknolojik üstünlüklerini sergilemesinin yarattığı şoku atlatmaya çalışan ABD hükümeti Gelişmiş Araştırma Projeleri Kurumu'nu (Advanced Research Projects Agency) kurmuştu. ARPA, Gould'un lazer ile ilgili olarak iddia ettiği türden çılgın olasılıkları bulacağını ve destekleyeceğini bildiriyordu. Gould ARPA'nın bildirisine iyi bir yanıt verdi: Geliştirdiği cihazın askeri kullanım alanının çok geniş olduğunu söyledi; çok daha kısa dalga boyu ile geleneksel ekipmana göre çok daha kesin hassasiyetle çalışan bir radar veya nişan almaya yardımcı olmak için uzaktaki hedefin üzerine kırmızı nokta yansıtan bir aygıt gibi pek çok proje üretilebilirdi. Gould, Ronald Reagan'ın 1980'lerdeki "Yıldız Savaşları" Stratejik Savunma Girişimi'ni haber verircesine, lazerlerin gücünün gelen füzeleri yok etmekte kullanılabileceğini dahi öne sürmüştü. Bu olasılık Hava Kuvvetleri'nin projeye Defender (Savunmacı) kod adını vermesine yol açmıştı.

Gould'un coşkulu ve öngörülü fikirleri ARPA ekibine ilham vermekle kalmadı, aynı zamanda şok edici sonuçlar üretti. Pek çok şirket hükümet kurumlarının bütçeleri kısmaya çalışmasına alışkındır. Devletle iş yaparken herkes bunu bekler. ARPA 300.000 dolarlık teklife olumlu bakmakla kalmayıp, TRG'nin, dikkatini tek bir seçenek üzerinde toplayarak çalışmak yerine aynı anda birkaç farklı teknoloji üzerinde çalışarak fazla mesai yapmasını talep etti ve lazer projesi için 1 milyon dolarlık bir bütçe ayırdı. Gould için her şey yoluna girecek gibiydi. Bundan sonrası düzlüktü. Ancak askeri bürokrasi buna izin vermeyecekti.

Beyniniz devlet sırrıdır

Kodamanların bu kadar büyük bir askeri uygulama potansiyeli olan TRG lazer projesini gizlilik kapsamına alması beklenen bir hareketti. Proje gizli olduğu için patent başvurusu yapılamayacaktı. Oysa patent konusunu önemseyen Gould TRG ile şirkette çalışırken ürettiği fikirlerinin patentinin kendisine ait olacağı konusunda anlaşmıştı. TRG, bu sorunun etrafından dolanabilmek için lazer projesini iki pakete ayırdı ve Gould askeri uygulamaları içermeyen birinci paket için 1959 Nisan'ında bir patent başvurusu yapacak konuma geldi. Gould muhtemelen işin zor kısmının geride kaldığını düşünmüştü. Sol fikirlerle, hâlâ McCarthy devrinin etkilerini atlatmaya çalışan bir Amerika için kaçınılmaz olarak şüpheli gelecek bir geçmişi olduğu doğruydu, ancak TRG'nin ARPA'daki bağlantıları tarafından güvenlik soruşturmasının basit olacağı konusunda kendisine güvence verilmişti. Daha yeni kurulmuş olan ARPA, ordunun çok sevdiği güvenlik düzeyleri oyununda ne yazık ki henüz ustalık kazanmamıştı.

Gould'un güvenlik düzeyi meselesi, Gould ve Goldmuntz'un 1940'larda ABD hükümetinin faydalanması için kurulan beyin takımı olan RAND ile (araştırma ve geliştirmenin kısaltması) yaptığı bir toplantıda ayyuka çıkmıştı. Gould ve Goldmuntz, Gould'un teklifini RAND'ın bilim insanlarıyla tartışmak için masaya oturduklarında, bir görevli, Gould'un güvenlik düzeyinin yeteri kadar yüksek olmadığını gerekçe göstererek teklifi içeren belgeyi göremeyeceğini söyledi ve belgeyi masadan kaldırdı. Bunun Gould'un çalışmalarını ve fikirlerini açıklayan bir teklif olduğunu unutmayın. Kendi teklifine bakmasına izin verilmemişti. Buna benzer şekilde Gould'un lazer çalışmasının yürütüldüğü TRG binasına girişi de derhal yasaklandı. Gould'un izin alması için karşısına çıkan ciddi sorunlardan biri, karısıyla, evlenmeden önce

birlikte yaşamış olması; ikincisi, güvenlik soruşturması sırasında referans gösterdiği kişilerden ikisinin sakallı olmasıydı. Bütün bunlar o zamanlar her şeyin ne kadar farklı olduğunu bize hatırlatmaktadır. Sakal bırakmak bölücü olmanın bir işareti olarak görülüyordu. Bunun böyle olmadığını kimseye anlatamazdınız.

Yakutların dönüşü

Gould ve Bell Laboratuvarları ekibi bir yandan bürokrasi ile boğuşup diğer yandan zahmetli araştırmalarına devam ederken bu alana üçüncü bir yarışçı girdi. 1950'lerde ABD'nin savunma sanayisinin başlıca şirketlerinden biri olan Hughes Aircraft Corporation, münzevi Howard Hughes tarafından kurulmuştu ve aynı Bell gibi yeni ürünler geliştirmek umuduyla yaratıcı fikirler içeren projeleri desteklemeye hazırdı. Bu projelerden biri daha hassas bir radar yapmak için daha ileri bir mazer teknolojisi üretmeyi içeriyordu. Hughes Corporation 1956'da bu projede görevlendirilmek üzere, elektrik mühendisliği okuyup üstüne fizik doktorası yaparak bu iş için ideal bir formasyon kazanmış genç bir adam olan Theodore Maiman'ı ve başkalarını işe aldı. Maiman lazeri gerçeğe dönüştürecek hem kuramsal hem pratik eğitimi almış biriydi.

Maiman yakut bazlı bir mazerin potansiyelini araştıran bir projede yakutlarla çalışmak hakkında pek çok şey öğrendi. Dikkat gerektiren bu iş (mikrodalgalar için gerekli olan enerji seviyelerinde çalışılırken bir yakutun sıvı helyum veya sıvı azotla soğutulması gerekmekteydi) Maiman'ı yakut manipülasyonunun uzmanı haline getirdi. Sırf mühendislik yapmak yerine araştırma yapmaya da hevesli olan Maiman, yakuttaki krom atomlarının daha yüksek enerji seviyelerine nasıl itilebileceğini incelemek için çok çaba harcadı. Townes'ın görünür

ışık ile optik pompa fikrini aldı. Bunun bir yakut mazeri için kullanışlı olup olmayacağını merak etti. Aynı zamanda görünür bir ışık çıktısı üretmek üzerine düşünmeye de başladı.

Güvenlik çılgınlığı

Bu sırada yarışta birinci gelme ihtimali en yüksek kişi olan Gordon Gould şirket avukatlarının yardımına rağmen hâlâ gereken güvenlik izinlerini alamamıştı. Ana sorunlardan birisi, Gould'un komünist yoldaşları olan eski arkadaşlarının isimlerini vermekteki isteksizliğiydi. Diğer kapitalizm yanlılarından farklı görünmemesine ve askeri endüstri kompleksinde çalışmaya hevesli olmasına rağmen, Gould'un sadakat duygusu paranoyak idarecilerin onun hâlâ liberal sol eğilimlere sahip olduğundan şüphelenmesine sebep olmuştu. Ne yazık ki Gould'un eski dostlarının hepsi, kendisi kadar alicenap değildi. Bunlardan birisi olan Herbert Sandberg, kendini temize çıkarmak adına devlet yetkililerine Gould'un adını verdi ve onun güvenlik açısından risk oluşturduğunu söyledi. Bu istihbarat bomba etkisi yarattı ve Gould tam temiz kâğıdını alacakmış gibi gözükürken, güvenlik oyununda tekrar başlangıç çizgisine geri döndü.

O ana dek, Gould'un gözbebeği olan TRG lazer projesinde yaklaşık yirmi kişi çalışmaktaydı ama Gould'un onların çalıştığı binaya girmesine bile izin verilmiyordu. Tavsiyesini almak için ona doğrudan soru soramıyor, ancak dolaylı, kaçamak, hipotetik sorular sorabiliyorlardı. Bu, bozulan arabanızı tamircinin size telefonla ilettiği talimatları yerine getirerek onarmaya çalışmanız gibi bir şeydi. Yazmış olduklarını okumak için yeterli güvenlik iznine sahip olmadığı gerekçesiyle Gould'un defterlerine el konulunca olaylar çığırından çıktı.

Yanlış düzeltme

Rakipleri sonuca Maiman'dan önce kolayca ulaşabilirdi, ancak Gould güvenlik sorunlarıyla cebelleşirken Schawlow da kendilerini uyarmak için kullanılan ışık enerjisini, ahenkli lazer ışığı demetlerine dönüştürmekte çok yetersiz olacaklarına inandığından yakutların işe yaramayacağına ikna olmuştu. Bu yargı, 1959 Haziran'ındaki bir konferansta başka bir araştırmacının sürecin etkililiği üzerine verdiği ve Schawlow'un kontrol etmek zahmetine katlanmadığı yanlış bir sonuca dayanmaktaydı. Bu küçük hata, ona yarışı kaybettirmek için yeterli olacaktı. Schawlow, Gould'un yapmış olduğu gibi uyarım materyali olarak daha iyi bilinen ancak kullanımı daha alengirli olan gazlara ve özellikle de metal buharlarına odaklanmaya devam etmişti. Maiman yakutlarla ilgili olan sorunu da aynı yıl eylül ayındaki bir konferansta Schawlow'dan işitmişti, ancak materyal üzerindeki kendi tecrübesine dayanarak Schawlow'un endişesinde yanlış bir şeyler olduğunu hissediyordu.

Maiman'ın iki büyük sorunu vardı. Biri, Schawlow'un söylemiş olduğu gibi kristal, güçlü ışık ile beyazlaşacağından yakutta yeterli sayıda elektronu uyarmanın mümkün olmayacağıydı (ancak böyle kristallerin optiğinde beyazlamanın temizlenmek anlamına gelmediğini, aksine elektronların hepsinin veya büyük kısmının uyarılması anlamına geldiğini biliyordu) bu tam da uyarılmış salım için uygun olan haldi. Bu durum yakutları bir kenara bırakmak için bir sebep olmaktan ziyade olumlu bir şey gibi gözüküyordu. Maiman ayrıca yakutun etkililiğini ölçmek için yapılan hesaplamalarda da sorun yaşıyordu. Bir şeyler yanlış gözüküyordu ve bu Maiman'ın aklını kurcalıyordu. Schawlow'un konuşmasıyla ikna olan patronu Maiman ile aynı fikirde değildi ancak Maiman, yakutun denemeye değer olduğunda ısrar etti ve tartışmayı kazandı.

Maiman'ın özellikle canını sıkan şey verim sorunuydu. Eğer yakutun içine pompalanan fotonların enerjisinin büyük kısmı stimüle emisyon üretmiyorsa, nerede emiliyor veya yeniden yayılıyordu? Eğer enerji giriyorsa, bir yerlerden çıkmalıydı ancak nereye gittiğini hiç kimse tam olarak bilmiyor gibiydi. Schawlow, ancak sıvı helyum ile soğutulduğunda işe yarayacağını düşündüğünden ve bu da deneyler için bir kâbus olduğundan Bell Laboratuvarları'nda yakut ile çalışmayı bırakmıştı. Maiman yakutun hem sarı/yeşil, hem de mavi/mor ışığı güçlü bir şekilde emdiğini biliyordu, ancak konferanstaki grafiklere göre bu enerjinin sadece yaklaşık yüzde 1'i stimüle emisyon ile sonuçlanıyordu.

Enerjinin kaçabileceği iki ana yol var gibi gözüküyordu. Bunların biri, mavi gökyüzünü oluşturan ve nesneleri görmemize izin veren basit dağılma idi. Burada, stimüle edilmiş olan bir elektron, kırmızı fotonu yaymadan önce ara bir seviyeye düşmek yerine ta başlangıçtaki enerji seviyesine geri düşüyor ve emmiş olduğu ışık ile aynı enerjiyi geri veriyordu. Enerjinin kullanılabileceği diğer olasılık, elektrondan gelen enerjinin maddedeki atomlarda kinetik enerjiye transfer edilmesiydi. Materyal bu şekilde ısınırdı. Maiman, enerjinin bu alternatif yolları izleyerek nasıl kaçtığını belirlemeye çalışırken lazer için yakut yerine hangi materyal kullanılırsa daha iyi sonuç alınacağını keşfetmeyi umuyordu. Ancak bunun yerine bir şok yaşadı.

Maiman deneylerinde göreli olarak düşük saçılma veya ısınma olduğunu keşfetmişti. Yakutun hakiki verimi hakkındaki ilk tahmini yüzde 70 civarındaydı ancak daha sonra yüzde 90 civarlarında olduğu ölçülmüştü. Rakipleri bir şekilde bu anahtar ölçümde çılgınca bir yanlışlık yapmış ve tüm stratejilerini bu hata üzerine kurmuştu. Maiman'ın müdürlerinin kendi sonuçları yerine Bell Laboratuvarları'nın sonuçlarına inanmakta daha ısrarlı görünmesi de işleri bu noktada kolay-

laştırmıyordu. Devam etmek için resmi olarak izin alamayan Maiman, patronuna haber vermeden bir yakut lazeri üzerinde çalışmaya başladı.

Parlak bir çözüm

Artık sorun yakutu aydınlatmaya ve bu elektronları tetiklenmeye hazır hale getirmeye yetecek kadar parlak bir ışık elde etmekti. Ark lambaları yeteri derecede parlaktı ancak çok fazla ısı üreterek yakuta zarar veriyorlardı, bu sebeple Maiman'ın ekibi sinema projektörlerinin ampullerinin endüstriyel versiyonlarını tercih etti. Bu dikkat gerektiren bir teknoloji olup lambaların yanıp kül olmalarını engellemek için soğutma sistemleri kullanılması gerekiyordu, ancak kesinlikle yoğundular. Bu ana kadar lazer tasarımıyla ilgili tüm fikirler lazerin aralıksız bir ışın olacağını varsayıyordu, ancak Maiman'ın asistanı olan Charlie Asawa, lazer üretecek materyali stimüle etmek için ışık atımları (palsler) kullanma olasılığını inceliyordu. Aşırı ısınmayı engellemek için lambaya parlamalar arasında soğuma fırsatı vereceğinden bu fikir kulağa cazip geliyordu. Bilimde genellikle meydana gelen mutlu kazaların örneklerinden biri de burada meydana geldi.

Asawa'nın arkadaşlarından biri hevesli bir fotoğrafçıydı ve fotoğrafçıların son teknoloji ürünü oyuncağını daha yeni satın almıştı. O zamanlarda gece fotoğrafçılığı, yüksek oksijenli bir atmosferde yoğun bir ışık parlaması üretmek için bir magnezyum veya zirkonyum şeridini yakan ve daha sonra çöpe atılması gereken flaş ampulleri kullanılmasını gerektiriyordu. Ancak Asawa'nın arkadaşı, bir kapasitörde elektrik yükü biriktiren, daha sonra da tipik olarak zenon gazı içeren düşük basınçlı bir tüpten bir seferde geçmesi için bunu salarak, ampulü değiştirmeden kapasitörün tekrar yüklenme

hızıyla tekrarlanabilen kör edici bir ışık üreten, yeni geliştirilmiş elektronik flaşlardan birini satın almıştı.

Elektronik bir flaştan gelen ışık, sağladığı enerji seviyeleri açısından ideal gözükmekteydi, kolayca kontrol ediliyordu ve uzmanların kullandığı projektör tipi ampullerin karmakarışık soğutma mekanizmalarının hiçbirine ihtiyaç duymuyordu. Kabul etmek gerekir ki kesintisiz ışın yerine atımlardan oluşan kesintili ışın üreten bir lazer yapmak o güne dek kimsenin aklına gelmemişti (ve iletişim gibi uygulamalarda muhtemelen hiçbir işe yaramayacaktı) ancak en azından gözle görülebilir ışıkla stimüle emisyonun mümkün olduğunu gösterebilecekti. Maiman bu fikre bir şans verecekti ama Hughes Corporation istemeden yoluna taş koydu.

1960 başlarında şirket laboratuvarlarını Culver City'den Malibu'da yeni bir yere taşımıştı. Bu çekici bir yaşam tarzına geçmek anlamına gelse de Maiman'ın tam ödül ufukta belirmişken laboratuvarını toplayıp taşınmasını gerektirdiğinden çok uygunsuz bir zamanlama olmuştu. Şansına hem Schawlow, hem de Gould gaz lazerlerinin uygulamasında, metal tortularının camı içeren tüpü opak hale getirmesinden pompalamayı yapmak için uygun ışık kaynağını bulmaya kadar çeşitli sorunlar yaşıyorlardı. Gould ayrıca hâlâ kendi projesine doğrudan katkı yapamıyordu. Nisan'da Pentagon'da bir güvenlik toplantısına katılmış, ancak bir sonuç çıkmamıştı.

Lazerlerin canlanışı

Gould'un güvenlik toplantısına katıldığı ay Maiman nihayet bir yakut lazeri yapmaya koyuldu. O zamanlar yaygın olan spiral biçimli flaş tüpünü kullandı. Spiralin içine ince bir silindirik yakut çubuğu koydu. Yakut çubuğun her iki ucunda da gümüş aynalar vardı ancak uçlardan birinde, lazer ışığı-

nın ortaya çıkabilmesi için gümüşe küçük bir delik açılmıştı. Her şey, bilim insanlarının gözlerini yoğun ışıktan korumak ve ışığı geriye doğru yansıtarak yakut çubuğa azami miktarda parlamanın yönelmesini sağlamak için yansıtıcı bir alüminyum kaplama içine sokulmuştu. Gaz lazeri deneylerinde kullanılan büyük, hantal, masa boyutlarındaki cihazın aksine Maiman'ın cihazı bir yumruktan daha küçük, derli toplu ve düzenliydi.

Deney düzeneği kurulduktan sonra geriye sadece cihazın çalışıp çalışmadığını görmek kalıyordu. Bu göründüğü kadar kolay değildi. Işığa maruz kalan yakut doğal olarak kırmızı ışık saçar ama bu ışık aynı-fazlı sıkı stimüle emisyon ışınıyla aynı şey değildir. Cihazın kırmızı bir ışık üretmesi, lazer ışını ürettiği anlamına gelmiyordu. Yani Maiman sıradan ışık parlamaları yerine sıkı bir spontan emisyon frekans aralığında ani, keskin bir sıçrama aramak zorundaydı. 16 Mayıs 1960'ta ekibi bir deneme yapmaya hazırdı.

Prosedür, bilimsel bir deneyin genelde olduğundan çok daha Hollywoodvari bir versiyonuydu. Maiman flaş lambasında göreli olarak düşük bir gerilim ile işe başladı ve beyaz bir hedef üzerinde konvansiyonel floresandan kırmızı bir benek oluşturdu. Ekibiyle birlikte gerilimi kademeli olarak artırıp ışığı giderek daha yoğun hale getirdiğinde benek giderek daha parlak bir hal aldı. Ancak gerilim biraz daha artırıldığında çıkış aniden sıçrama yaptı, bir osiloskop üzerinde ölçülen flaş kısaldı ve ekrandan yansıyan yoğun kırmızı benek karanlık odayı aydınlattı.

Başarı beklenmedik bir yoldan gelmişti. Ancak iş 16 Mayıs'ta henüz bitmemişti. Maiman'ın sonuçlarını yayınlaması gerekiyordu ve kısmen cihazından optik bir mazer olarak bahsetmesi ve *Physical Review Letters*'ın editörünün, mazerlerin modası geçmiş olduğunu düşünmesinden ötürü *Review*'dan makale-

si için ret cevabı aldığında şok oldu. Maiman bunun yerine prestijli dergi *Nature*'da kısa bir makale yayınlamayı başardı ve yavaş hareket eden *Journal of Applied Physics*'te daha uzun bir makale yayınlamayı planladı (nihayetinde başka bir yerde yayınlanacaktı).

Zamanın acımasız bir hızla geçtiğinin farkında olan Hughes Corporation, lazeri dünya basınının dikkatine sunarak 7 Temmuz'da bir basın toplantısı düzenledi. Sunum açısından bu olay, lazerin gelişmiş iletişim gibi gerçekçi potansiyel uygulamaları üzerineydi, ancak basın mensupları gördükleri şeyin heyecan verici bir manşet potansiyeli olduğunu biliyordu ve bunun prototip bir ışın silahı olup olmadığı hakkında bir yorum istediler. Maiman bu konuya girmek istemedi ancak lazerin bir silah olarak asla kullanılamayacağını da söyleyemedi. Basın için bu kadarı yeterliydi ve Maiman'ı dehşete düşüren şu tür manşetler atıldı: "Los Angeles'lı adam, bilimkurgulardaki ölüm ışınını keşfetti."

Bitiş çizgisine ilk kim ulaştı?

Maiman'ın ilk lazeri yaptığına şüphe yoktur, ancak Schawlow'un uygulanamaz olarak bir kenara atmasına rağmen bir aşamada yakut lazerinin kendi fikirleri olduğunu iddia eden (inatla cihaza hâlâ optik bir mazer diyen) Bell Laboratuvarlarından ciddi bir şikayet gelmiştir. Ancak bir Bell ekibi aynı yıl Noel'den hemen önce bir helyum/neon karışımına dayanan, çalışan ilk aralıksız lazeri (ilk barkod okuyucularında kullanılan teknoloji olacaktır) yapmayı başarmıştı.

Lazerin altında yatan kavram için yapılan patent savaşına gelince Gould (güvenlik iznini asla alamadı) 1964'te Birleşik Krallık'ta bir patent almayı başardı ancak patent hakkı ABD tarafından tanınana kadar 1980'lere dek beklemesi gerekti.

İlginç olan şey şuydu: 1964'te Nobel Ödülü kafa karışıklığı yaratacak acemice bir dille "mazer-lazer ilkesi"nden bahsederek Townes, Basov ve Prokhorov'a verildi. Nobel komitesinin genellikle ödülleri deneyciler yerine kuramcılara vermeyi yeğlediği bilinse de seçilen isimler çok daha önemli olan lazer yerine mazerle ilişkili olduklarından bu tuhaf bir karardı.

Yeni bir tür ışık

Bu ana kadar insanların karşılaştığı her tür ışık, ister Güneş'ten, ister bir ampulün filamenti veya ateş gibi ısıtılan bir nesneden gelsin, kaotikti. Fazları birbirine bağlanmayan fotonlar herhangi bir yönde uçuyor ve bundan bir enerji karışımı ve dolayısıyla renkler oluşuyordu. Ancak lazer ve mazer, fotonların birbirine ayak uydurduğu ve neredeyse tek renkli ışıktan oluşan yönelimli bir ışın olduğu anlamına geliyordu. Lazer ışınları öyle sıkıdır ve dağıtılmaları öyle zordur ki, görece sıkı foton demetleri halinde Ay'a gönderilmiş ve oradan yansıtılarak Dünya'ya geri döndürülebilmiştir.

Maiman'ın basın konferansından sonra belirgin hale geldiği üzere lazerler halka tanıtılır tanıtılmaz zihinler, bu yeni ışık türünün nasıl kullanılabileceğine döndü. Eğer lazerin geliştirilmesinin kendisi takdire şayan bir başarı ise lazerlerin kullanılması bu ışığı kuantum çağının alamet-i farikası yepyeni âlemlere taşıyacaktı.

BÖLÜM 7

IŞIĞI KULLANMAK

İlk lazerin duyurulduğu basın toplantısında basın mensuplarının aklına, bilimkurgunun ana unsurlarından olan ışın tabancasının gelmesi kaçınılmazdı. Bu, kısa süre içerisinde kesinlikle bir silah haline getirilebilecek çok güçlü bir ışık demetidir. 1964 yapımı *Altın Parmak* adlı filmin bir sahnesinde yakut kırmızısı ışın altın bloğunu tereyağı gibi kestikten sonra acımasızca James Bond'a doğru ilerler. Sinemaseverler bu kırmızı renkli ışının Sean Connery'yi ikiye bölmeye çalışmasına ilk deneysel lazerin üretilmesinden sadece dört yıl sonra tanık olmuştu.

Aslında lazerlerin kullanım amaçlarının büyük kısmı bu kadar heyecan verici etkinlikler içermez, ancak lazerlerin koydu mu oturtacağına dair şüphe yoktur. Peki, güçsüz bir ışık demeti nasıl oluyor da altın bloğunu kesebiliyor, casusları ikiye bölebiliyor? Bu soruya yanıt ararken, çocukken oynadığımız bir şeye tekrar göz atmak yararlı olacaktır. Çoğumuz mutlaka mercek kullanarak bir şeyler yakmışızdır.

Işığın ısısı

Beş duyumuz olduğunu söyleriz. Aslında bir duyumuz daha var desek yeridir. Unuttuğumuz bu duyuyla derimiz spekt-

rumda görünür aralığın hemen altında olan kızılötesini tespit eder. Güneş ışığının sıcaklığını derimizde hissetmeye alışkınızdır. Ancak güneş ışınlarını dışbükey bir mercek ile odakladığımızda sonuç tatlı bir sıcaklık hissinin çok ötesine geçer; odunu kavurup kâğıdı tutuşturmaya yetecek kadar çok enerji toplanmış olur. Fotonlardan bazıları tekrar yayılarak nesneyi gün ışığında görmemizi sağlar, ancak diğer fotonlar elektronları uyarırken ortaya çıkan enerji atomları titreştirerek harcanır. Titreşen atomlar ısınır. Işığın mercekle odaklanması sırasında çok küçük bir bölgeye çok fazla enerji pompalanır. Sıcaklık, tutuşma adını verdiğimiz kimyasal süreçte materyalin havadaki oksijenle tepkimeye girmeye başlayacağı dereceye kadar yükselir.

Bu mercek, çoğu zaman bir parça kâğıdı tutuşturmaktan fazlasını yapamaz, ancak Güneş'in ışınlarını yoğunlaştıran cam vazolar yüzünden evlerin yandığı görülmüştür. Eski Yunan matematikçi ve mühendis Arşimet, yaşadığı kentin savunmasında kullanılmak üzere optik bir mekanizma önermişti. Kentin limanında eğimli devasa aynaların inşa edilmesini tavsiye etmişti. Bunlar güneş ışınlarını yoğunlaştırarak düşman gemilerini ateşe vermek için kullanılacaklardı. Gemiler yeteri kadar hareketsiz kalırlarsa, özellikle de ahşaptaki boşlukları kapatmak için katran kullanılmışsa Arşimet'in fikri, ilkesel olarak işe yarayabilirdi, ancak bildiğimiz kadarıyla bu aynalar hiç inşa edilmemiştir. Ancak ilkesel olarak bu ilk ölüm ışınıdır.

Lazer ışınları ile büyüteç tarafından toplanan güneş ışınlarının gücü aynı prensibe dayanır ancak güneş ışınlarının farkı, çok uzağa çok daha yoğunlaştırılmış olarak ulaşabilmesi ve dalgaların (veya foton fazlarının) birbirine ayak uydurarak etkiyi enerjiyi hedefe verimli bir şekilde iletmeye yatkın hale getirmesidir. İster altını eritmek, ister gözde ameliyat yapmak

için kullanılsın, lazer kontrol edilen küçük bir bölgedeki sıcaklığı son derece hızlı bir şekilde artırarak arzulanan kesme etkisini sağlar. Orduyu ilgilendiren soru, elbette bu yeteneğin uzun mesafeden uygulanarak lazeri güçlü bir silah haline getirip getiremeyeceği olmuştu. Cevap hem evet, hem de hayırdı.

Ölüm ışınları

Gordon Gould'un önermiş olduğu gibi askeri alanda lazerler artık silahların hedeflenmesinde kullanılmaktadır. Bu hedeflemede başlıca iki yöntem uygulanır. Birincisi konvansiyonel bir tabanca veya tüfeğin üzerine gözle görülen lazer ışını üreten bir aygıt yerleştirilir. Bu aygıt, hedefin üzerine bir lazer noktası yansıtarak, silahı kullanan kişinin nişan almasını kolaylaştırır. İkinci yöntem ise biraz daha karmaşıktır ve bir silah sisteminin parçasıdır. Kızıl ötesi (görünmeyen) lazer ile hedefe "işaret" konur ve üzerinde bu işareti "okuyabilen" bir algılama modülü bulunan mühimmat hedefe gönderilir. Ancak lazerleri doğrudan silah olarak kullanmaya gelince, bilimkurgulardaki klasik ışın silahından hâlâ çok uzakta olduğumuzu söylemek gerek. Elde taşınabilen ışın silahına muhtemelen en yakın olan şey, lazerlerin düşmanı geçici olarak kör edecek bir silah olarak kullanılması çabası olabilir. Bir lazere doğrudan maruz kalmanın geçici körlüğe sebep olabileceğine dair şüphe yoktur, ancak geçici ile kalıcı göz hasarı arasındaki sınır çok incedir ve bu silahlar genel olarak ahlak dışı gözükmekte olup 1998'den beri aktif olan Birleşmiş Milletler Kör Edici Lazer Silahları Protokolü'nün geliştirilmesine yol açmıştır.

Ancak bu protokol sadece özel olarak *kalıcı* körlüğe sebep olmak için tasarlanmış olan silahların kullanımını engelle-

mektedir ve arada sırada kalıcı körlükle sonuçlansın veya sonuçlanmasın, uygulamada geçici bir etki yapması amacıyla hâlâ bu silahların kullanılabileceği anlamına gelen yasal bir boşluk bulunmaktadır. (Uluslararası Af Örgütü'nün iddiasına göre, 2001-2012 yılları arasında 500'den fazla kişinin ölümüne yol açan şok tabancalarında da buna paralel bir sorun mevcuttur.)

Günümüzde iyi bir bilimkurgu ışın silahından beklediğimiz yıkıcı gücü üretebilecek lazerler elde taşınamayacak kadar büyüktür. Bunların çoğu hâlâ geliştirilme aşamasındadır. Ancak ABD Donanması'nda gemilere monte edilecek "Lazer Silah Sistemi" neredeyse kullanıma hazırdır. Bu silah sisteminin, dronları ve küçük tekneleri etkisiz hale getirmek için kullanılması amaçlanmaktadır. ABD'de üzerinde durulan diğer fikirler kara hedeflerini hassas şekilde vurmak veya füzeleri yok etmek için tasarlanmış olan hava lazerlerini içerir. Bu silahlar hedefi doğrudan imha etmez, bunun yerine hedefin dış yüzeyini ısıtıp gerilim yaratarak arızaya sebep olur ya da agresif olarak hasar veren şok dalgaları yaratmak için yüzeyin bir kısmını yeterli şekilde buharlaştırır. Bu kitap yazılırken lazer silahlarının üretilmesi için çabaların büyük kısmı, bütçe kesintileri sebebiyle sonlandırılmıştı. Lazerin savaş meydanında kolayca kullanılan bir silah olması için uzun süre geçmesi gerekecektir.

Işıkla eritme

Bir hedefin yüzeyini buharlaştırarak gerilim yaratma fikri uç noktada gözükebilir, ancak lazerlerin en heyecan verici uygulamalarından birinde kullanılmakta olan bir yaklaşımdır: atalet hapsi ile nükleer füzyon. Kaliforniya'daki Lawrence Livermore Laboratuvarı'ndaki Ulusal Ateşleme Tesisi'ni zi-

yaret ederseniz, Bond'un kötü adamlarının herhangi birini gururlandıracak bir lazer düzeneği ile karşılaşırsınız. Başlangıçta küçücük olan bir ışın, on kat yüksekliğinde devasa iki koridor içinden geçerek bir canavara dönüşür.

Küçük bir başlatıcı lazerinin kızılötesi çıktısı, alt ışınların her biri ışınların gücünü 10 milyar kat artıran bir lazerden geçirilerek 48 ayrı yöne bölünür. Bu ışınların her biri daha sonra tekrar bölünür, devasa ana amplifikatörlerden geçirilerek genel gücü 6 megajüle kadar çıkarmak üzere bir milyon kat daha artırılacak şekilde 192 ışın haline getirilir. (Parlama o kadar güçlüdür ki 5.000.000.000.000 ampul gücünde tek bir ampul saniyenin trilyonda biri kadar bir süre boyunca yakılmış gibi olur.)

Bu 192 ışın, nihai görevi yerine getirmeye daha uygun olan morötesine çevrilir. Bir reaksiyon odasında ışınlar donmuş küçük bir döteryum/trityum yakıt çökeltisi üzerinde bir araya gelir. Çarpma anında çökeltinin dış yüzeyi buharlaşarak kalan yakıtı nükleer füzyonu gerçekleştirebilecek derecede sıkıştırabilecek kadar yoğun bir şok dalgası üretir. Bu kitap yazılırken bu reaksiyon "ateşlemeyi" (füzyonu başlatmak için gerekenden daha fazla enerji üretilmesi) henüz sağlayamamıştı, ancak Ulusal Ateşleme Tesisi, hedefe uygulanandan daha fazla enerji üretmeyi başarmıştı. (Lazerler yüzde 100 verimli değildir ve cihaz tarafından tüketilen enerjinin büyük kısmı, çökeltiye uygulanmak yerine amplifikatörlerde harcanır.)

Her yerde lazer var

Gaz ve kristal lazerler endüstriyel ve askeri uygulamalarda oldukça yaygındır ve süpermarketlerdeki tanıdık barkod okuyucularda karşımıza çıkar ama bu lazerlerin özellikle-

ri evde etrafımızda bulunan lazerlerin (lazer yazıcılar, lazer işaretçiler ile CD, DVD ve Blu-ray okuyucular) özellikleriyle aynı değildir. Bunlar, düşük bir enerji standardı olarak yer alan LED ışığı ile aynı aileden olup yarıiletken lazerlerdir. Bir yarıiletkenden lazer ışığı üretmenin mümkün olabileceği hakkındaki ilk fikrin geçmişi henüz hiçbir lazerin inşa edilmemiş olduğu 1958'e kadar gider ve 1962 gibi erken bir tarihte yarıiletkene dayanan görünür bir lazer inşa edilmiştir. Sadece atomlar halinde ve kriyojenik sıcaklıklarda çalışabildiğinden modern katı halli lazerlerin gerçek bir öncülü değildir, ancak 1970'e gelindiğinde Bell Laboratuvarları ve SSCB'deki paralel gelişmelerle oda sıcaklığında çalışan modern yarıiletken lazer geliştirilmiştir.

Bu yeni lazer biçimi "farklı-eklemli" (valens ve iletim bantları arasında eşit olmayan boşluklar olan iki ince yarıiletken katman arasında bulunan bir arayüz) olarak bilinen bir yapıyı kullanmaktaydı. Konu yarıiletken lazer olduğunda bu, iki geniş boşluk arasına sıkışmış boşluk materyalinden dar bir bant demektir. Her biri aynı fazlı ışık üreten diyotun özel bir çeşidi olacaktır. Bu cihazlar geleneksel lazer türlerinden çok daha ucuz olmakla kalmazlar, ayrıca çok geniş bir aralıkta ekipmana sığabilmek için çok daha küçük olarak inşa edilebilirler. Yarıiletken lazerler, geleneksel lazerlerden neredeyse bin kat daha fazla satılmakta ve ev ile işyerlerinin çoğunda bulunmaktadır.

Gerçek görünüm

Lazerlerin gizli ajanları kesip doğramak dışında kullanışlı hale gelmesi beklenenden fazla zaman alan ilk kullanım yerlerinden biri, daha lazer ortada yokken ilkesel olarak ortaya çıkmış olan hologramdı. Hologram, İkinci Dünya Savaşı'nın

hemen ardından Macar-Britanyalı bilim insanı Dennis Gabor tarafından hayal edilmişti. Gabor sadece kuramla ilgilenmeyip aynı zamanda fikirleri için pratik uygulamalar isteyen birisiydi. Ergenliğinde ev yapımı bir X-ışını makinesi inşa etmişti. Önce Berlin'de mühendislik okumayı düşünmüş olsa da dünya çapındaki fizikçilerden etkilenerek bilime yöneldi.

Gabor o zamanlarda emekleme evresinde olan elektron mikroskobunu geliştirmenin yollarını aramaktaydı. Bir şekilde daha geniş bir görüş açısı sağlanabilirse mikroskobun görüntüsünün geliştirilebileceğini fark etti. Bu uygulamanın işe yaramadığı ortaya çıktı ancak Gabor'u, düz bir resim yerine farklı yönlerden farklı perspektiflerden bakarak, ışık kullanarak gerçek bir nesne gibi görülebilecek bir fotoğraf çekmenin yollarını aramaya itti.

Gabor'un farklı açılardan baktığınızda değişen hakiki üç boyutlu görüntü demek olan hologram fikrinin sırrı, düz bir fotoğraf ile gerçek bir duruma bakışı birbirinden ayırt etmekte yatıyordu. Yan yana iki pencere düşünün. Birinde gerçekten ayırt edilemeyecek kadar yüksek çözünürlüklü mükemmel bir şehir manzarası fotoğrafı olsun. Diğerinden de normal bir şehir manzarası görünsün. İki görüntü arasındaki farkı kolayca ayırt edebilirsiniz. Biraz gezindiğinizde pencerenin arkasında farklı mesafelerdeki nesnelerin sebep olduğu paralaks, birbirlerine kıyasla hareket ediyor gibi görünmeleriyle sonuçlanır. Mesela pencerenin diğer ucuna gittiğinizde, aranızda bulunan şeyler belli nesnelerden gelen ışığı artık engellemeyeceğinden daha önce başka nesnelerin ardında kalan o belli nesneleri de görebilirsiniz. Düz bir fotoğrafta bu olmaz.

Şimdi cam pencerenin yüzeyini hayal edin. Farklı nesnelerden farklı açılardan gelen her bir foton, camın yüzeyine ulaşır. Fotoğrafın yaptığı tek şey, belirli bir noktada yoğunluk ve rengi toplamaktır. Ancak bunun yerine her bir fotondan bilgi

yakalayabileceğinizi, daha sonra da pencereyi başka bir yere taşıyabileceğinizi hayal edin. Eğer pencereyi aynı fotonları üretmek üzere stimüle edebilirseniz, o zaman camın düz yüzeyinde gerçekten üç boyutlu bir görüntü elde edebilirsiniz.

Hologram bu şekilde çalışır. İşi basitleştirmek için elimizde bir şehir manzarası değil de bir oyuncak olduğunu, bunun da tek renkli bir ışıkla (ilk hologramlarla uyumlu olması için yeşil olsun) aydınlatıldığını hayal edelim. Oyuncaktan yansıyan ışık, cam penceremize isabet eder.

Her bir fotonun yoğunluk ve yönün yanı sıra bir fazı da mevcuttur ancak fotoğraf filmi kullandığımızda sadece yoğunluk etkili olur. Ama camın yüzeyine, aynı yönden ikinci bir ışık demeti gönderdiğimizi hayal edelim. Oyuncaktan gelen ışık ile doğrudan ışık karışır ve bir karışma motifi üretir. Eğer bu motif depolanabilirse, normal bir fotoğraftan çok daha fazla bilgi verecektir. Ve eğer bu motifi camdan çıkan foton akışını tekrar yaratmak için kullanabilirsek, üç boyutlu görüntüyü tekrar yaratabiliriz.

Bu, Gabor'un görüşüne göre hipotetikti çünkü işe yaramaları için fotonların çok özel olmaları, enerjilerinin özdeş olması ve fazlarının bağlanması gerekiyordu, aksi halde karışma etkisi arzulanan sonucu üretmeyecekti. İyi filtreler göreli olarak tek renkli bir ışık üretir, ancak fotonların fazları hakkında yapılabilecek bir şey yoktur. Tüm fotonların eşzamanlı olarak tetiklendiği ahenkli bir ışık üreten bir lazer yapılana dek bu böyle kalacaktır. Çalışan ilk lazerden sadece dört yıl sonra Michigan Üniversitesi'nden Emmett Leith ve Juris Upatnieks, oyuncak bir tren ve bir çift doldurulmuş güvercinin tuhaf, hareketsiz hali olan ilk gerçek hologramı üretmiş, Gabor'un imkânsız görüşü mümkün hale gelmişti.

1977'de Londra'da Royal Academy'de gösterilmiş olan "Fantastik Işık" adlı ilk hologram gösterilerinden birini ziya-

ret etmiş olduğumu hatırlıyorum. Bir açıdan çok sıradandı. Işıl ışıl parlayan yeşil bir ışıkla aydınlatılmış nesnelere bulanık, küçük bir dizi pencereden bakmak gibiydi. Ancak aynı zamanda, bir çeşit zihinsel kuantum çakıştırmasıyla orada bir nesnenin bulunmadığını fark ediyordunuz. Daha sonra da lazer kapanıveriyor ve siz görünüşte üç boyutlu olan bu şeyin nasıl da bir illüzyon olduğunun farkına varıyordunuz. Bakmış olduğunuz tek şey, üzerinde noktalardan anlamsız bir motif bulunan bir cam parçasıydı.

Parçalanmış bir illüzyon

Yukarıda sözünü ettiğim iki pencere deneyi üzerinde biraz düşünürsek hologramların takdire şayan doğası ve geleneksel bir fotoğraftan nasıl farklı olduklarını anlayabiliriz. Her iki "pencerenin" de sol üst köşe hariç her tarafını sildiğimi, iki tarafta da sadece yaklaşık iki santimetrekarelik bir alanı görünür bıraktığımı hayal edin. Fotoğrafta bilginin neredeyse tümünü kaybederiz. Mesela eğer bu sol üst köşede sadece mavi gökyüzü varsa, sadece mavi gökyüzünü görürüz. Bu küçük parçaya bakarak şehir manzarası hakkında bir şey söyleyemeyiz.

Ancak gerçek cam pencerede işler çok farklıdır. Evet, fotoğrafçının resmi çekmiş olduğuna benzer bir konumda sadece gökyüzünden bir kare görebilirim. Ancak yakına gelir ve biraz dolanırsam, penceredeki kareden farklı açılarda bakabilir ve şehir manzarasının büyük kısmını hâlâ görebilirim. Camın sadece bu küçük parçasından bakabileceğim için üç boyutlu görüntü kadar iyi bir görüntü alamam, ancak uç noktalardaki açılardan bakarak manzaranın büyük kısmını görebilirim. Aynısı hologram için de geçerli olmalıdır. Hologramın sadece köşesi kalmış olsa bile, bu köşeden bakarak geleneksel fotoğrafın aksine tüm manzara hakkında bilgi sahibi oluruz.

Hologramdaki küçük kareye daha az foton isabet edecek, bu yüzden de görüntü daha soluk ve daha az belirgin olacaktır (görüntü almak için kullanılan çözünürlük sınırı sebebiyle sınırlamalar da olacaktır), ancak geleneksel fotoğrafın aksine bir hologramın herhangi bir parçasının çok daha fazla bilgi içererek bakan kişinin görünür olan tüm manzarayı tekrar inşa etmesine olanak vereceği hakikati değişmeyecektir.

Yansıma üzerine

Hologramların, hatta lazerlerin ilk olarak bir uygulama arayışı ile geliştirilmiş teknolojiler olduğunu söylemek doğru olacaktır. Pratikte hologramların en faydalı uygulamaları çok farklı iki yönde ilerlemiştir. En basit olan holografik şeritler güvenlik sağlama ve holografik veri saklamak için kullanılmaktadır.

Kredi ve banka kartlarında, bazı süslü kâğıt paralarda ve lüks ürünlerde gördüğünüz en yaygın güvenlik hologramları, genellikle holografik bir görüntünün karışma motifinin metal bir folyo üzerine basıldığı yansıma hologramlarıdır. Bu gerçek bir üç boyutlu görüntü oluşturmasa da, bakanın sadece alacalı bulacalı bir parazit motifi görmemesini sağlamak için akıllıca bir hileye başvurur.

Bir yansıma hologramının bir ya da daha fazla katmanı bulunmaktadır. Her bir katmanda ışığın bir kısmı geri yansır ve bu farklı katmanlar arasındaki parazit, aksi halde sadece birden fazla rengi olan bir karmaşa olacak olan şeyden holografik görüntüyü ortaya çıkartır. Bazen bu güvenlik etiketlerinin hologram bile olmadıkları söylenir. Bunu söylemek biraz haksızlık olur. Bunlar hologramdır, ancak nesneye farklı yönlerden bakmanıza olanak veren hakiki üç boyutlu görüntüyü de sağlamazlar. Holografik bir teknolojidirler, ancak geleneksel bir görsel hologram oluşturmazlar.

Ancak bunların bazıları, beyaz ışık kullanılarak görülebilir. Bunlar gökkuşağı renklerinin alışılmadık bir aralığında göründüğünden gökkuşağı hologramı olarak adlandırılır. Holografik görüntü her zamanki şekilde, sadece dar bir aralıktan üretilmiştir. Işık hologramdan gönderildiğinde ışığın dalga boyuna bağlı olarak görüntünün farklı bölümleri görülür; beyaz ışık görüntünün tamamını üretir ancak renkleri farklı şeritler halinde dizer. Hologramların çoğu gibi gökkuşağı hologramlarının da arkadan aydınlatılması gereklidir. Güvenlik etiketi olarak işe yarayabilmeleri için önden gelen ışığın hologramın içinden geçmesi, daha sonra da yansıtıcıya çarparak geri dönmesi için arkalarına yansıtıcı materyal konmaktadır.

Üç boyutlu hafıza

Her yerde kullanılan holografik güvenlik etiketinin faydalı bir icat olduğuna şüphe yoktur, ancak bu kadar heyecan verici bir kuantum teknolojisinden beklenecek türden nefes kesici bir uygulama değildir. Hologramların bir başka kullanım şekli daha çok umut vaat etmektedir: holografik veri depolama. Bilgisayarlarımız hızlandıkça ve yaşamlarımızda daha çok yer kapladıkça (cebinizdeki telefonun da başlı başına gelişmiş bir bilgisayar olduğunu unutmayın) giderek daha büyük bir depolama kapasitesine ihtiyaç duyuyoruz. Eski fotoğraf filmli makineleri kullanıyor olsak belki birkaç düzine fotoğraf çekmekle yetinecekken bugün her zaman elimizin altında olan fotoğraf makinelerimizle çoğumuz yılda binlerce fotoğraf çekiyoruz.

Aynı zamanda müzik ve videolar için depolama gereksinimimiz ise tavan yapmış durumda. Optik depolamada yazılabilir CD'ler ve DVD'ler üzerine yazan lazer, bir süreliğine

en yaygın depolama mekanizmalarımızdan biri oldu, ancak artık bunlar da revaçtan düşmektedir. Üreticiler optik sürücüler geliştirilince bir zamanların o çok kullanışlı disket sürücülerinden nasıl vazgeçtilerse bugün materyalimizin büyük kısmını "Cloud"da depolamak için interneti kullanmamızdan ötürü aynı o şekilde optik sürücüleri bilgisayarlara koymaktan vazgeçtiler. Ancak Cloud sadece kavramsal bir varlıktır. Belgelerimiz ve resimlerimizin göze hoş gelen bu flu görüntüsünün ardında, bilginin eski moda manyetik disk sürücülerde depolandığı devasa veri merkezlerinde videolar ve şarkılar beyaz, kabarık bir kütle içinde kaybolmaktadır. Taşınabilir cihazlarımız genellikle katı halli hafızada bilgi depolarken veri merkezinin (büyük ölçeklerde üretilmesi çok daha ucuz olan) manyetik diskleri, devasa miktarda verinin depolanması için uygun olan tek yöntemdir.

Ancak bu depolama gereksinimi giderek artmakta ve daha fazla yer ve güç gerektirmektedir. Mesela Flickr gibi fotoğrafla ilgili bir Cloud sitesi kullanıcılarının her birine 1 TB (bir milyon megabayt) büyüklüğünde bedava depolama alanı verdiğinde bu veri merkezlerinin altüst olması kaçınılmaz olacaktır. Özellikle de şarkılar ve videolar gibi nadiren değişen bilgi türleri için hologramlar potansiyel bir cevaptır. Bunun sebebi bir hologramın büyük miktarda veriyi çok dar bir alanda depolayabilmesidir. Bu genellikle üç boyutlu görüntüyü yeniden inşa etmek için gereken karmaşık bilgidir, ancak geleneksel dijital veriyi depolamak için kullanılmaması için bir sebep de yoktur.

Pratik olmaktan ziyade hâlâ kuramsal olan holografik depolamanın arkasındaki fikir, görsel bir hologramda tecrübe ettiğimiz gibi depolamanın parazit motiflerinden tek bir düzleme sahip olmak yerine üç boyutlu bir kristal olması, materyal içerisinde binlerce düzlemde bilgi depolayarak

bu derinliğe sahip hologramlar oluşturmasıdır. Eğer böyle bir yaklaşımda iyice uzmanlaşılabilirse, holografik belleğin geleneksel bir disket sürücüsü karşısında üç büyük avantajı olacaktır. En belirgin avantaj kristalin çok daha dayanıklı olmasıdır. Bir hard disk, çok hassas bir tabak üzerinde bir Boeing 747 hızında hareket eden, bir kıldan daha ince bir kafaya sahiptir. Hassas olmalarına şaşırmamak gerek. Ancak holografik bir kristalin depolama mekanizması içerisinde hareket eden bir parçası yoktur.

İkinci avantaj kapasiteyle ilgilidir. Manyetik bir disk iki boyutludur. Günümüzde kullanılan diskler çok ince olsalar da aynı ölçülere sahip bir alana kendilerinden binlerce kat fazla bilgi depolayabilen holografik kristallerle rekabet edemezler. Bir de hız meselesi var. Bir hard diskin hızı, kafasının uygun konuma gelmesi ve daha sonra diskin üzerindeki manyetik motiflere, her seferinde bir bit olarak lineer bir şekilde tepki vermesi için gereken zamanla sınırlıdır. Bir hologramda aynı anda daha fazla veriye ulaşılabilir ve bir veriden diğerine bir ışık demetinin yer değiştirme hızıyla geçiş yapılabilir.

Holografik depolamanın dezavantajı, veri kaydetme işleminin manyetik diske oranla daha yavaş olmasıdır. Holografik depolamayı pratik, sağlam ve ticari hale getirmenin önündeki önemli engeller aşılabilirse, veri merkezleri karma modeller kullanmaya başlayabilir. Manyetik diskler dengesiz ve hızla değişen verileri saklamak için kullanılmaya devam edecektir. Ancak arka planda veriler, şimşek hızında ulaşılabilecekleri holografik depolara kaydırılabilecektir. Yazdığınız, birkaç saatlik bir süre içerisinde birkaç defa düzelttiğiniz ve daha sonra sildiğiniz bir belge, muhtemelen kristale hiç gitmeyecektir. Ancak disk kullanımıma bir göz attığımda belgelerin büyük kısmının haftalar, aylar hatta yıllar boyunca değiştirilmemiş olduğunu görüyorum; ayrıca fotoğraf, müzik

ve video gibi çok daha fazla yer tutan şeyler de var. Bunların tamamı, pahalı, hantal manyetik sürücülerden müsait olduğunda holografik kristallere rahatlıkla taşınabilir.

Gerçek bir dünya görüntüsü

Hologram denen şeyin varlığından haberdar olduğumuz andan buyana belki de hepimiz günün birinde gerçek holografik fotoğraflar görebilmeyi umuyoruz. Gazetede, bilgisayar ekranında veya aile albümünde gördüğünüz fotoğrafların, ilk hologramlar gibi tek renkli ve bulanık görüntülerden ya da (geçmişi Victoria çağına kadar uzanan ve her bir gözün önüne ayrı ayrı resimler koymaya dayanan geleneksel üç boyutlu fotoğrafçılıkla elde edilen) kartondan kesilmiş gibi duran objelerden ibaret olmak yerine gerçeğin kendisinden neredeyse farksız üç boyutlu tertemiz görüntüler olduğunu hayal edin. Geleneksel üç boyutlu fotoğraflarda (veya üç boyutlu filmlerde) üçüncü bir boyut bulunmaktadır ancak gerçek üç boyutlu dünya ile asla karıştırılmazlar.

Holografi teknolojisinde devasa bir atılım gerçekleşmediği sürece muhtemelen buna benzer bir gelişme görmeyeceğiz. Lazerler doğaları gereği tek renklidirler ve hologramın lazerle aydınlatılan bir görüntüye ihtiyaç duyması, mevcut hologramların hiçbirinin doğal ışıkla oluşturulamayacağı veya doğal renklere sahip olamayacağı anlamına gelmektedir. Hologramları görmüş olduğumuz dünyanın gerçekçi portrelerinin dünyasına taşımak için yapılacak belirgin bir sıçrama yoktur ve bilimkurgu, hareket eden üç boyutlu görüntüleri genellikle bir çeşit gelişmiş hologram olarak gösterse de (*Yıldız Savaşları* adlı filmde Prenses Leia'nın R2-D2 tarafından oluşturulan görüntüsünü düşünün), gelecekte üç boyutlu bir görüntüyü boşluğa yansıtabilmek muhtemelen tamamen farklı bir teknoloji sayesinde mümkün olacaktır.

Işıldayan bir elmas

Kuantum ışığının tuhaf ve şahane dünyasını terk etmeden önce, Oxfordshire kırsalında takdire şayan iş çıkartan başka bir ışık kaynağından da söz etmek gerek. Bu ışık lazerden çok farklıdır. Cenova'da bulunan CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nı (BHÇ) hemen herkes işitmiştir. Harwell-bazlı Elmas Işık Kaynağı, BHÇ'nin minyatür bir versiyonunu andırır, ancak kuantum çağına yaptığı değerli katkılar göz önüne alındığında, CERN'in faaliyetleri onun yanında modası geçmiş kalır.

BHÇ gibi hızlandırıcılar parçacıkları neredeyse ışık hızına kadar hızlandırırlar. Yaptıkları iş genellikle kuantum fiziği değil de parçacık fiziği olarak tanımlanır. Bu ayrım zooloji ile biyoloji arasındaki farka benzer. Kuantum fiziği, aynı biyoloji gibi kuantum parçacıklarının nasıl davrandığının temellerini anlatırken, parçacık fiziği zoolojinin belirli hayvanlardan bahsetmesi gibi bize parçacıklar hakkında bilgi verir.

Hızlandırıcılar bilimin özellikle acımasız bir çeşidi ile başa çıkmak için geçtiğimiz yüzyılın ortalarından beri inşa edilmektedirler. Parçacıkları son derece yüksek hızlara ulaştırarak birbirleriyle çarpıştırır ve sonuca bakarlar. Bu, mekanik bir saate balyozla vurup parçaların dağılışını ağır çekimde filme alarak saatin nasıl çalıştığını anlamak için uğraşmaya benzer. Sonuçta, başka türlü asla göremeyecek olduğumuz parçacıklara ulaşırız. Ve ilk zamanlarda, bu devasa makinelerin laboratuvarlarında istenmeyen bir yan etki olduğu keşfedilmişti. Senkrotronlar olarak bilinen ilk hızlandırıcılar 1940'larda kurulduklarında, büyük miktarda elektromanyetik radyasyon yaydıkları keşfedilmişti. Işık yayıyorlardı.

Senkrotronlar halkanın çevresinde uçan yüklü parçacıkların enerjilerini artırmak üzere ayarlanmış yüksek hızda titreşen bir dizi güçlü elektromıknatıs kullanırlar. Elektronlar

halkanın etrafında dönmek için ivme kazanmak zorundadır. Bunun sebebi ivmenin hızda bir değişiklik olması, hızın da hem sürati, hem de yönü içermesidir. Sabit süratle hareket eden bir cisim eğer bir dairesel yol izlemeye zorlanırsa ivme kazanır. Ve Niels Bohr'un atomun yapısını çözmek için uğraşırken keşfetmiş olduğu üzere bir elektron ivme kazandığında foton saçar. Eğer senkrotron mıknatıslarının bu sabit girdisi olmasaydı elektronlar hızla enerji kaybederlerdi.

İlk araştırmacılar için bu "senkrotron ışıması" bir atık ürün, istenmeyen bir yan etkiydi. Ancak atık ürünler de arada sırada kullanışlı olabilirler. Mesela Marmite'ı düşünün. Bira üretimi esnasında geride yapış yapış, vıcık vıcık siyah bir artık kalır. Bira imalatçıları bu maddeyi atmaktansa bundan hoş kokulu bir ezme yapılabileceğini keşfetmişlerdir ve Marmite (Avustralya'daki Vegemite ile birlikte) doğmuştur. Bir atık ürün olması gereken şey (eğer Marmite seviyorsanız) kendi başına değerli bir ürün haline gelmiştir.

Aynı şey senkrotron ışımasında da olmuştur. İvmelenen elektronların ürettiği ışığın spektrumu çok genişti, son derece yoğundu ve nihayetinde sadece bu ışıma sıçramalarını üretmek amacıyla senkrotronlar üretilmeye başlandı. Bunların ilki Britanya'da Cheshire Daresbury'de kuruldu, sonra onun yerini Harwell'daki daha gelişmiş Elmas aldı. Büyüklüğü ve esnekliği bir kenara Elmas'ın öncüllerine göre en büyük artısı dalgalandırıcılar ve solucanlar içeriyor olmasıydı. Bunlar, elektronları sinüs dalgalarından bir motif çizmeye zorlayan, birbirini izleyen mıknatıslardır. Dalgalandırıcılar dar bir ışıma bandı oluşturan sıkı, dar bir dalgalanma oluştururken solucanlar daha geniş bir frekans bandı oluştururlar.

Elmas'taki ana depolama halkasının etrafında, barakalar olarak adlandırılan çalışma istasyonları ve ışın yolları bulunmaktadır. Bu istasyonlar hem deneye ev sahipliği yapar hem

de ışımanın çıkış yolları olarak vazife görür. Elmas'ın 45.000 metrekarelik devasa zemininde (St. Paul Katedrali'nin yaklaşık sekiz katıdır) şu anda yirmiden fazla ışın yolu mevcuttur ve nihai konfigürasyon için 40 taneye kadar yer vardır. Halkanın konumuna bağlı olarak bunlar kızılötesi, görünür, morötesi veya X-ışını üretebilirler.

Kara kutunun içi

Elmas gibi bir senkrotron ışık kaynağının uygulamalarından bazıları "diğerleri gibi ama daha iyi"dir. Örneğin X-ışınları tekniği Britanyalı baba-oğul William ve Lawrence Bragg'e 1915'te Nobel Ödülü'nü kazandırmasından buyana kristallerin yapısını belirlemek için kullanılmaktadır. X-ışınları, bir yapıyı dolaylı yoldan ortaya çıkarmak için bir kuantum fenomeninin doğrudan uygulanmasıdır.

Bir ayakkabı kutusunun büyüklüğünde, belirgin bir özelliği olmayan, dışında pek çok deliği olan bir kutunuzun olduğunu hayal edin. Kutunun içerisinde keşfetmek istediğiniz bir şey olsun, ancak kutuyu açamıyorsunuz. Yapabileceğiniz şey deliklerin birinden içeri bir bilye bırakmak ve nereden çıkacağına bakmaktır. Kutuyu pek çok farklı açıda tutarak ve tüm delikleri ayrı ayrı deneyerek bunu tekrarlarsanız, içerde ne olduğuna dair bir çeşit fikir elde edebilirsiniz. X-ışını kristalografisi biraz buna benzer.

Bir demet X-ışını kristalin içine çok farklı açılardan yansıtılır. İçeride X-ışını fotonları, atomların elektronları tarafından emilecek ve tekrar yayılacaktır. Tekrar yayılan bu fotonlar daha sonra kristal örgüsü içerisinde farklı pozisyonlardan gelen diğerleriyle etkileşime girecektir. Bu örgüdeki mesafelere bağlı olarak fotonların fazları birbirlerini destekleyecek veya iptal edecektir, yani X-ışınları nihayetinde çıktığında karanlık

ve aydınlık işaretler oluşturacaktır. Farklı yönlerden çekilen bu resimlerin binlercesini birleştirerek kristalin yapısı hakkında bir çıkarım yapmak mümkündür.

Daha sonraları Crick ve Watson tarafından DNA'nın yapısını ortaya çıkarmak için kullanacağı DNA difraksiyon motiflerini üretmek için Rosalind Franklin'in kullanacağı teknik tam olarak buydu. Ancak laboratuvardaki süreç çok ağır ilerledi. Elmas'ın nasıl bir fark yaratabileceğinin bir örneği, Cardiff Üniversitesi'nde görevli Pierre Rizkallah (bir kristalograf) ile David Cole'un (bir biyolog) çalışmasından gelmektedir. Cardiff'teki ikili 2013'te Elmas'ta T-hücreleri üzerinde çalışmaktaydı. Bunlar dolaşım sisteminin tıbbi polisleri olup bakterileri ve diğer istilacıları yok etmekle görevli beyaz kan hücreleridir.

T-hücreleri başka bir hücrenin içine bakarak içeride neler olup bittiğini görme becerisine sahiptir. Bunu, yüzeylerinde bulunan T-hücre reseptörleri adlı, sırf bu iş için oluşmuş proteinleri kullanarak yaparlar. Bunlar, MHC (majör histokompatibilite kompleksi) adındaki diğer büyük moleküllere yapışırlar. MHC'ler vücut hücrelerinden çıkarlar ve hücrenin içyapısına bağlı olarak farklılık gösterirler. Bir T-hücresi vücuda ait olan dost bir hücre ile bir istilacıyı, MHC'nin şekline ve T-hücre reseptörlerine uyup uymadığına bakarak ayırt edebilir.

Ancak bu süreç bazen doğru dürüst çalışmaz. Organ nakillerinde olduğu gibi T-hücresi bazen tanımadığı dost hücrelere saldırabilir. Veya kanser hücreleri gibi yok edebileceği hücreleri tespit etmeyi başaramaz ve böylece yok edemez. Bir kanserli hücrenin üzerindeki MHC'ler, T-hücresini kandırabilmek için normal bir hücre üzerindekilere aşırı benzerlik gösterir. Rizkallah ve Cole'un yaptığı, reseptörlerin bir kanser

hücresine yapışması ancak sağlıklı hücrelere bağlanmaması için T-hücre reseptörlerinin şekli ve MHC'ler ile nasıl etkileşime girdiklerini araştırmak için X-ışınlarını kullanmaktır. Eğer bunda başarılı olunursa yapmaları gereken tek şey bir hastanın T-hücrelerini almak, hedeflenen kanserli hücreleri öldürecek katilleri üretmek için modifiye etmek ve kanserli bölgeye tekrar enjekte etmek olacaktır.

Laboratuvarda karşılarına geleneksel bir sorun çıkar: Karmaşık yapılar çok bulanık bir görüntü oluşturduğundan, tek bir poz alabilmek için yaklaşık sekiz saat uğraşmak zorunda kalacaklardır. Tek bir yapıyı inşa etmek için binlerce poz gerektiğinden tek bir molekülü analiz etmek üç yıl sürebilir. Elmas'taki X-ışınları bir X-ışını tüpünden 100 milyar kat daha güçlüdür. Böylece bu tür yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler bugün saniyenin onda biri kadar kısa bir sürede üretilebilmektedir. Ekip artık bir günde üç yapıyı analiz edebilmektedir ve gelecekte daha da yüksek hızlara ulaşmayı ummaktadır.

Kakayı zaplamak

Elmas'taki diğer uygulamalardan bazıları, Güneş'ten milyonlarca kat daha parlak olan çıktısıyla, optik güç açısından eşsizdir. Mesela 2013 yılında York Üniversitesi'nden Mark Hodson yer solucanı dışkısını incelemek için Elmas'ı kullanmaktaydı. Özellikle solucan gübresinde depolanmış olan yaklaşık 2 milimetre çapındaki minik kalsiyum karbonat kürelerini inceliyordu. Kalsiyum karbonat çok yaygın bir mineraldir (mesela kireçtaşı, mermer ve tebeşiri oluşturur) ve çimentodan kâğıt beyazlatıcıya kadar her şeyde kullanılır. Kalsiyum karbonat genellikle kristalimsi bir yapıya sahiptir, ancak bu solucan atıklarında kristalimsi olmayan amorf bir biçim de alır.

Amorf biçim genellikle kararsız olup dakikalar içerisinde bir kristal haline geldiğinden bu durum, malzeme bilimciler için gerçekten ilgi çekicidir. Ancak solucan dışkısında yıllarca dayanabilir. Katışıklı oluşu (saf halde bulunmayışı) onu daha kararlı kılmaktadır. Eğer bu süreç anlaşılabilirse borularda kireç birikimini azaltmaktan inşaat malzemelerinin dayanıklılığını artırmaya kadar pek çok şeyde faydalı olabilir. Laboratuvarda granülleri öğütmek ve bileşimi tanımlamak mümkündür, ancak materyali kararlı tutmak için katışıklılığın amorf materyalde nasıl dağıldığını belirlemek mümkün değildir. Elmas'ın güçlü kızılötesi ışınlarıyla solucanların sırrı keşfedilebilir (ışık ne kadar parlak olursa çözünürlük o kadar yüksek olur).

Bunlar çok sayıda uygulamadan sadece iki tanesidir. Elmas günde 24 saat çalışarak barakalara ışık verir, entegre devre tasarımları ve uçak motoru parçalarından görmüş olduğumuz doğal yapılara kadar her şeyin doğası ve yapısı hakkında bilgi sahibi olabilmemiz için aynı anda pek çok farklı deneyin yürütülmesini sağlar.

Evlerimizde asla senkrotron ışık kaynakları göremeyeceğiz, ancak lazerler bizimle olmaya devam edecek. Lazeri Elmas gibi uzman bir laboratuvar cihazı olmaktan çevremizde kullanılmaya hazır bir şey haline getirmenin temellerinden birisi, son derece soğutulmuş kriyojenik bir ortam yerine oda sıcaklığında kullanılabilme becerisidir. Ancak biz, sonraki bölümde son derece düşük sıcaklıklarda çalışılırken keşfedilen bir kuantum fenomenine soğuk bir dalış yapacağız.

Süper iletkenler ilk kez, mutlak sıfıra yakın olan bu frijit bölgede keşfedilmiştir.

BÖLÜM 8

DİRENÇ FAYDASIZDIR

Lisede gördüğünüz derslerden Newton yasalarını veya başka fizik kurallarını hatırlıyorsanız, belki elektrikle ilgili bir formülü de hatırlıyor olabilirsiniz: V=IR. Bir elektrik devresinde gerilim (V), geçen akımın (I) dirençle (R) çarpımına eşittir. Direnç, sürtünmenin elektrikteki halidir. Sürtünme bir yüzey üzerinde bulunan nesnelerin hareketini kısıtlar. Bir uçak veya havaya atılan bir top için de hava direnci benzer bir rol oynar. Benzer şekilde, serbest elektronların bir parça metalden geçerlerken sonsuza kadar hareket etmeleri gerekir, ancak elektrik direnci bunu engeller. Ama 100 yıl kadar önce Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes gayet takdire şayan bir şey fark etmiştir.

Doktor Soğuk

Profesör Kamerlingh Onnes Leiden Üniversitesi'nde çalışıyordu ve ilgi alanı kriyojenik idi, başka deyişle, materyallerin çok düşük sıcaklıklardaki davranışlarını inceliyordu. Son derece soğuk maddelerin üretiminde kullanılan mekanizmalar konusunda muhtemelen dünyanın bir numaralı uzmanıydı. (Bu bölümde kendisinden pek çok defa bahsedeceğim için,

aslında "Kamerlingh Onnes"u kullanmamız gerekse de soyadını Onnes olarak kısaltma cüretinde bulunacağım.) 1908'de, o tarihe kadar ulaşılabilmiş olan en düşük sıcaklık olan 1,5 K'de sıvı helyum elde edebilmişti. Çok düşük sıcaklıklar için daha kullanışlı olan Kelvin termometresi bu sıcaklığı gösterir.

Kelvin ölçeği en düşük sıcaklık olan mutlak sıfırın varlığını yansıtmaktadır. Bir maddenin sıcaklığı atomları veya moleküllerinin enerjisinin bir ölçütü olduğundan ve mutlak sıfırda atomların her biri mümkün olan en düşük enerji halinde bulunduğundan bu sınır mevcuttur. (Görmüş olduğumuz gibi, atomlar, kuantum parçacıkları olarak mutlak kesinlik ile sabitlenemediklerinden pratikte mutlak sıfıra asla ulaşılamaz.) 17. yüzyıl sonlarında mutlak sıfır ilk kez tahmin edildiğinde, kuantum kuramı bir kenara, atom ve moleküllerden bile kimsenin haberi yoktu, ancak sıcaklık azaldığında gaz basıncında bir düşüş olduğu gözlenmişti. Mutlak sıfırın bu basıncın artık mevcut olmayacağı sıcaklık olduğu tahmin edilmişti. Daha tanıdık olan Celcius ölçeğinde mutlak sıfır –273,15°C'dir, ancak mutlak sıfıra yakın olan sıcaklıklarda çalışırken Kelvin ölçeği Celcius ile aynı birim büyüklüklerine sahiptir, ama mutlak sıfırı 0 ile gösterir.

Derecenin birimleri kelvin olup K ile temsil edilir (°K ile değil), yani 1,5 K –271,65°C'ye eşdeğerdir. 1911 yılında Onnes bu çok düşük sıcaklıklarda metallerin iletkenliği üzerinde deneyler yapmaktaydı. Bir parça cıvayı 4,2 K'ye kadar soğuttuğunda (tanıdık olan bu "sıvı metal" sıcacık 234 K'de [–39,15°C] donduğundan bu aşırı sıcaklıklarda katıdır) direnci tamamen ortadan kalkmıştı. Hareket eden bir nesneyi vakumlu bir ortama sokmak gibiydi. Onu durduracak ne bir sürtünme, ne bir hava direnci ne de başka bir şey olmaksızın nesne, sonsuza kadar hareket edecektir. Buna benzer şekilde

cıvadaki elektronlar da onları durduracak herhangi bir şey yokmuş gibi hareket ediyorlardı. Görünüşte bir direnç yoktu, sınırsız bir şekilde akıyorlardı. Böyle bir "süperiletken" materyalden yapılmış bir halkaya elektrik akımı verilince, düşük sıcaklık korunabildiği sürece akım hiçbir engelle karşılaşmadan materyalden geçecektir.

Direncin sıfır olduğu bir nokta bulunduğundan şüphelenmek bir şeydir, bunun bir varsayım olmayıp tamamen gerçek olduğunu göstermek başka bir şeydir. Pratikte direncin tam olarak sıfır olduğunu kesin olarak kanıtlamak mümkün değildir; yapılacak tek şey, ölçülebildiği kadarıyla doğru olduğunu belirleyebilmektir. Bu bile basit değildir. Onnes'in bunu göstermek için tuttuğu yollardan biri, sıvı helyuma batırılmış bir süperiletken tel halkadan akım geçirmekti. Daha sonra içinde sıvı helyum bulunan kabın dışındaki manyetik alanı belli aralıklarla ölçüyor ve bir fark olup olmadığına bakıyordu. Daha basit anlatmak gerekirse, kabın çevresine bir dizi manyetik pusula yerleştiriyor ve ibrelerdeki titremeleri gözlüyordu. Eğer halkadaki akım direnç sebebiyle zamanla düşüyorsa, meydana getirdiği elektrik akımı değişmeliydi, ancak hiçbir şey olmamıştı. Onnes bu deneyi, helyum buharlaşana dek sadece birkaç saat sürdürebiliyordu, ancak 1950'lerde benzer bir deney, akımdaki azalma sebebiyle manyetik alanda hiçbir değişiklik tespit edilmeden on sekiz ay sürdürülmüştü.

Otoriteye meydan okumak

1911'de bu kadar düşük sıcaklıklara inebilmek karmaşık işler yapmayı gerektiriyordu. (Elbette bu hâlâ evde tek başınıza mutfakta yapabileceğiniz bir iş değildir.) Onnes'in laboratuvarının fotoğraflarına bir göz attığınızda büyük pirinç

cihazlar, büyük, önemli görünüşlü göstergeler ve spagetti gibi birbirine dolanmış metal borularla CERN'in buhar makineleriyle çalışıyor gibi gözüken bir bilimkurgu versiyonunu görürsünüz. Bir geminin makine dairesine benzeyen bu laboratuvarda Onnes, bir gemi kaptanıyla aynı güce sahipti. Pek çok asistanı vardı, ancak bunu genellikle tek yazar olduğu makalelerinde fark edemezdiniz. (Bunun, zamanın önde gelen bilim insanlarının yaygın bir kusuru olduğu kabul edilebilir.) Onnes, kendi çağının ölçütlerine göre dahi, geleneksel yöntem ve usullerin kalıntısı olan ataerkil ve buyurgan bir figür olarak görülüyordu. Sırf entelektüel yeteneklerinden güç alan yeni tip bilim insanları, inandıkları doğruları sosyal konum ve otoritelerinden aldıkları güçle savunan bu eski kuşağı çoktan ortadan kaldırmıştı. Evet, Onnes'in mükemmel bir bilim insanı olmadığını iddia etmek mümkün değildi ama tavırlarının bir önceki yüzyıldan kalma olduğu da bir gerçekti.

Süperiletkenliğin keşfi, hem Onnes hem de fizik dünyasında büyük şaşkınlık yarattı. Kuramsal modellerde dirençsizlikle baş etmek kolaydır, ancak gerçek dünyada işler karışır. Direnç yaşamın bir gerçeğidir. Tüm bunların yanı sıra süperiletkenlik, gerçekleşmesi beklenen şeyin tam olarak tersiydi. 1911'de Amerikalı fizikçi Robert Millikan'ın elektronu bulgulaması fizikçilerin hiç rahatını kaçırmamıştı. Elektron elektrik taşıyan bir parçacık olarak hoş karşılandı. Gaz borudan nasıl pompalanıyorsa, elektronların da telden öyle geçtiği ve böylece elektrik akımı oluştuğu düşünülüyordu. Dolayısıyla sıcaklık yeteri kadar düşürüldüğünde "gaz"ın donacağını ve elektron akışının duracağını düşünmek fizikçilere mantıklı geliyordu. Pek çok kişi elektrik direncinin kaybolması yerine sonsuza doğru artmasını bekliyordu. Onnes ise tam tersini düşünüyor, direncin sıcaklıkla birlikte düşeceğini, ancak

mutlak sıfıra ulaşmak mümkün olmadığından asla sıfıra inmeyeceğini öne sürüyordu. Onun için direncin sadece düşmesi değil, 1,5 K'de sıfıra vurması sürpriz olmuştu.

Elektrik direnci, bazı elektrik devrelerinde oldukça kullanışlı olsa da elektrik mühendisinin başının belasıdır. Mesela elektriği uzun mesafelerde nasıl ilettiğimizi düşünelim. Çok büyük gerilimler taşıyan, göz zevkimizi bozan bu devasa yüksek gerilim hatlarına ihtiyaç duymamızın sebebi, gerilim ne kadar yüksekse dirence bağlı iletim kaybının o kadar düşük olmasıdır. Bir iletkendeki elektrik enerjisinin önemli bir kısmı, elektronlar iletken metalin atomlarıyla etkileşime girdikçe ısıya çevrilir (buna örnek olarak elektrikli sobaların bileşenlerini düşünün). Bir süperiletkende iletim kaybı olmayacaktır. Süperiletkenlerden oluşan bir ağ, güç dağıtımında devrim yaratacaktır. Ancak Onnes'un bunun boş bir hayal olduğunu fark etmesi uzun sürmemişti. Bir iletkeni bu kadar düşük sıcaklıklarda tutmak, iletim kaybını ortadan kaldırmanın yaratacağı avantajdan çok daha büyük bir dezavantaj yaratıyordu.

Dahası, süperiletkenlik ilkesel olarak (süper güçlü mıknatısları vurgulayarak) sınırsız akım üretme becerisi vaat etse dahi, pratikte kendi kendini engeller. Elde tutulur bir manyetik alan oluşur oluşmaz sürece müdahale ederek süperiletkenliği durdurur. Benzer şekilde, her bir tel için bir akım sınırı olup bunun üzerinde süperiletkenlik etkisi yok olur. Tüm bu sınırlamalar varken süperiletkenliğin pratik uygulamalarının tüm sihriyle ortaya çıkabilmesi için uzun bir süre geçmesi gerekecektir. Ancak kesinlikle ortaya da çıkacaklardır. Şimdilik direncin ortadan kaybolması, doğal bir tuhaflıktan fazlası değildir. Nadir görülen bir olaydır, ancak pek önemi yoktur. Onnes'in 1913'te almış olduğu Nobel Ödülü'nün açık bir şekilde süperiletkenlikten bahsetmemesi takdire şayandır.

Manyetizmasız bölge

Bu direnç eksikliği vurgusuna geri geleceğiz, ancak ilk olarak, bir süperiletkenin diğer anahtar özelliğinin Berlin'deki Alman ulusal doğa ve mühendislik bilimleri enstitüsü Physikalisch-Technische Bundesanstalt'da Walther Meissner ve yüksek lisans öğrencisi Robert Ochsenfeld tarafından keşfedileceği 1933'e gitmemiz gerekiyor. Michael Faraday'ın çalışmasından itibaren fizikçiler, James Clerk Maxwell'in rafine edip nitelemiş olduğu bir manyetik alan kavramından haberdardı. Bir elektrik akımını başlatan şey, bir manyetik alan içerisinde bir elektrik iletkeninin hareket ettirilmesidir; jeneratörler bu şekilde çalışır. Manyetik alanlar boşlukta yayılır ve katıların içerisinden geçerler (kalıcı mıknatıslar bu etkiyi ancak bir dereceye kadar yaratabilirler). Ancak Meissner ve Ochsenfeld, Meissner etkisi olarak bilinecek şeyi keşfetmişlerdir. Tam olarak elektrik direncinin ortadan kalktığı sıcaklıkta, bir iletken, içinden geçen manyetik alanı uzaklaştıracak ve alanın, nesnenin etrafında bükülmesine sebep olacaktır.

Onnes'in keşfi nasıl şaşkınlık yarattıysa Meissner de manyetizmanın kovulabileceği sonucuna ulaşmayı hiç beklemiyordu. Ochsenfeld ile birlikte, yavaş yavaş süperiletken haline gelmekte olan metal bir silindirdeki manyetik alanın değişimini inceliyorlardı. Silindirin manyetik alanı tamamen uzaklaştırması beklenmiyordu. Onnes'in süperiletkenliği keşfetmesinden beri bu alanda pek yol alınamadığı için, Meissner'in keşfi bu etkiyi açıklama yolunda önemli bir adım olarak algılandı. Felix Bloch adlı bir fizikçi, "Süperiletkenlik hakkında kanıtlanabilen tek kuram, süperiletkenlik kuramlarının tümünün çürütülebilir olduğudur," yorumunu yapmıştı. Ancak Meissner etkisi, tamamen yeni bir keşif alanı açmıştı.

Bir kuantum ürpertisi

Bu iki davranış, yani sıfır direnç ile manyetik alanların uzaklaştırılması süperiletkenlerin karakteristik davranışlarıdır. Beraberce bu kuantum fenomeninin bir dizi pratik uygulamasını üretirler. Ancak nasıl gerçekleştiklerini gözlemlemek başka bir iştir, *neden* gerçekleştiklerini açıklamak ise bambaşka bir iş. Onnes, o zamanlar kuram taslak halinde ve eksik olsa da süperiletkenlik ile yeni kuantum mekaniği arasında bir bağlantı olduğundan şüpheleniyordu. Daha sonraları, kuantum etkilerinden yardım istemeden süperiletkenliğin asla açıklanamayacağı ortaya çıktı. Elektronların kuantum parçacıkları olduğu gerçeği bu etkinin çok küçük bir kısmını açıklıyordu.

1930'larda bir iletkenden elektrik akımı geçiren elektronların iletkenin içinde fazlasıyla yöresizleşmiş olduğu (artık atomla özel olarak ilişkili olmadıkları) kesin gözüküyordu. Elektronlar ile iletkenin katı halde dahi sürekli titreşen atomları arasındaki etkileşimin iletkenin katışıklılıklarıyla bir araya gelerek her zaman bir çeşit direnç oluşturması bekleniyordu. Onnes bu direncin sıcaklık düştükçe giderek azalmasını bekliyordu, ancak kuramda, süperiletkenlik devreye girdiğinde direncin aniden sıfıra düşeceği tahmininde bulunmayı gerektirecek bir şey yoktu.

Bir açıklama için ilk ipucu, kardeşi Heinz ile Nazi Almanya'sından birlikte (adına uygun olarak Londra'ya) kaçmış olan Fritz London'un Royal Society'deki bir toplantıda süperiletken bir nesnenin, iletim elektronlarının etrafında bir bulut gibi onu manyetik bir alanın müdahalesinden koruyarak ve Meissner etkisine sebep olarak devasa tek bir atom gibi davranıyor olduğu fikrini öne sürmesiyle ortaya çıkmıştı.

İlk bakışta bu, ileri atılmış bir adım gibi gözükmemektedir. Nihayetinde iletim elektronlarının belirli herhangi bir atom-

la sıkı sıkıya etkileşimde olmadığı uzun zamandır bilinmekteydi. Ancak London'un önerdiği şeyin devrimci ve hafifçe korkutucu olan yanı bunun görülebilir ve dokunulabilir (tabii kalın eldivenleriniz varsa) bir nesne ölçeğinde bir kuantum mekaniği süreci olmasıydı. Genel olarak konuşmak gerekirse kuantum fiziği tüm tuhaflığı ile sadece atomlar, fotonlar, elektronlar ve benzerleri gibi çok küçük şeylerin seviyesinde uygulanabilir. Tipik olarak kuantum etkilerine sahip olabilen en büyük şey, yaklaşık olarak küçük bir virüs büyüklüğündedir. Bundan daha büyük olan şeylerde maddeyi oluşturan parçacıklar arasında çok fazla etkileşim olacak ve eşfazlılık kaybolacaktır. Ancak London (ilkesel olarak metrelerce uzunlukta olabilen) bir süperiletkende kuantum davranışın standart olacağını söylüyordu.

Kuantum titreşimleri

London süperiletkenliğin anlaşılmasını sağlamak açısından çok önemli bir gözlem yaptı; elektronların dirençle karşılaşmayan bir akım üretmek için bir dalga işlevini paylaşarak bir lazer ışınındaki fotonlar gibi tutarlı ve kolektif şekilde davrandıkları önermesinde bulundu (*bkz.* sayfa 129). Ancak birbirlerini iten ve pek de sosyal sayılamayacak olan elektronlar nasıl bu şekilde hareket ediyorlardı? Üç önemli kişi, John Bardeen, Leon Cooper ve Robert Schrieffer, süperiletkenliğin temel ilkeleri hakkındaki en sağlam bilgimiz haline gelen bir cevapla ortaya çıktılar. Ancak bu cevap London'un Royal Society konuşmasından bir iki yıl sonra bulunmadı. Her şeyin yerine oturmasından önce tam 27 yıl geçmişti.

Transistörün gelişimine de katkısı olan John Bardeen, bu kitabın bir çeşit kahramanıdır (*bkz.* sayfa 68). Her iki çalışması için de Nobel Ödülü kazanarak çift ödüllülerden oluşan

son derece seçkin kulübün bir üyesi olacaktır. İkinci Dünya Savaşı'ndan önce dahi Bardeen, iletim elektronları ile bir süperiletkeni meydana getiren atomlar arasındaki ilişki üzerinde düşünmekteydi. Bu atomların elektronlara belki de bir şekilde bir destek verebileceklerine inanıyordu.

Tüm atomlar titreşir ve özellikle düzenli bir yapısı olan katılarda bu titreşimler, materyaller boyunca hareket edecek olan fononlar olarak adlandırılan dalgaları üretir. "Fotonlar" ile olan isim benzerliğinin işaret ettiği üzere bu dalgalar belirli bir dereceye kadar enerji içerir; gelişigüzel titreşemezler, materyalin yapısı tarafından sadece belirli modlarda titreşmek üzere sınırlandırılırlar. Ve "dalga benzeri olasılık özellikleri" olan tipik kuantum parçacıkları değil, gerçek dalgalar olsalar da bu enerji, kuantum mekaniği kurallarına tabi oldukları anlamına gelir.

Bardeen materyaldeki fononlar ile iletim elektronları arasındaki bir etkileşimin süperiletkenlik için çok önemli olduğunu hissediyordu ve 1950'lerde, bir materyalin süperiletkenliğe geçtiği kritik sıcaklık maddenin izotopları arasında değişkenlik gösterdiğinden atomların kesinlikle bir rol oynadığı (bunun sadece elektronların etkisi olmadığı) gösterildi. Bir izotop, bir atomun, çekirdeğinde farklı sayıda nötronu, ancak aynı sayıda proton ve elektronu olan bir çeşididir. Mesela uranyumun ünlü U-235 ve U-238 izotopları vardır. Bunlar eşit sayıda proton ve elektrona sahiptir (yani kimyasal olarak özdeşlerdir), ancak U-238'in çekirdeğinde, 143 nötronu olan U-235'e göre üç tane daha fazla nötron vardır.

Eğer süperiletkenlik sadece elektronlara bağlı olsaydı, o zaman aynı materyalin farklı izotoplarının kritik sıcaklıkları arasında bir fark görmek beklenmezdi, ancak gösterilmiş olduğu gibi bir fark varsa, süperiletkenlik sürecinin bir parçası olarak atomun bir bütün halinde davrandığı ortaya çıkar. Bu

özel titreşimin yaptığı şey, akla mantığa aykırı bir etki doğuruyor gibi gözükmektedir. Elektronların tümü negatif yüklüdür ve elektromanyetizmayla ilgili tecrübelerimizden birbirlerini itmeleri gerektiğini bekleriz. Ancak bir süperiletkende elektronların, süperiletkende gördüğümüz etkileri üretmek için etkili bir şekilde birbirlerini çekmeleri gerekmektedir.

Şilte etkisi

Bir kuramı basitleştirerek anlatmak için görsel bir örnek vermek gerektiğinde fizikçiler kendilerini bovling toplarından söz etmekten alamazlar. Genel görelilik ve kütleçekimini açıklamaya çalışanlar genellikle lastik bir şeridi esnetirken, süperiletkenliği bir modelle izah etmeye çabalayanlar bovling toplarını yumuşak bir şilte üzerine yerleştirir. İlk top şilte üzerinde yuvarlanır ve geçtiği yolu çökerterek ardında bir iz bırakır. İkinci top da şiltenin çöken kısmı yavaş yavaş yükselerek eski halini almadan birincinin ardından yuvarlanırsa kaçınılmaz olarak bu izi takip eder. Sonuç olarak, yumuşak şilte ortamında ikinci top birincinin çekimine kapılır. Süperiletkende katı maddeyi oluşturan soğumuş, yavaş tepki veren iyonlar şiltenin gevşek yayları gibi iş görerek elektronları birbirlerine bağlar ve onlara izleyecekleri doğal bir yol açmış olurlar.

Süperiletkenliği açıklayacak bir kuram geliştirmek için nihai hamle 1957'de yapıldı. John Bardeen, Leon Cooper ve Robert Schrieffer, daha sonra yaratıcı bir şekilde BCS kuramı olarak adlandırılacak fikirleri ortaya attı. Leon Cooper ("Cooper çiftleri" adını verdiği) elektron çiftlerinin şilte örneğindeki gibi birbirlerine bağlanabileceğini zaten daha önce göstermişti. Cooper çiftleri, malzemenin yavaş tepki vermesinden (eski biçimine yavaş dönmesinden) ötürü birbirine doğru iti-

len, birbirlerine ters yönde dönen elektronlar olup bir iletkenden geçerken tek bir varlıkmışçasına davranırlar. Elektronlar elektrik direnci üretmek üzere fononlar tarafından yeteri kadar dağıtılacaklarsa, Cooper çiftleri birbirlerinden ayrılmak zorundadır. Kuantum parçacıklarının konumlarının belirsizliği sebebiyle her bir elektron çifti etrafındaki diğer çiftlerle çakışarak çiftlerin tümünün tek bir varlıkmışçasına etkileşime girdikleri kondensat adlı hali oluştururlar. Tek bir çiftin fononlar ile ayrılması kolayken bir kondensatta böyle bir ayrılma çiftlerden oluşan topluluğu etkileyecektir, bu nedenle bu olasılık daha düşüktür. Çiftler süperiletken içinde hayalet gibi birlikte akıp giderler.

Süperiletkenlerin neden var olması gerektiğini ve dirençten nasıl kaçındığını açıklamak için geliştirilen kuramlar ile paralel olarak deneyciler, süperiletken malzemelerin çalışma sıcaklığını, hiç kullanışlı olmayan 1,5 K'den daha idare edilebilir 20 K'lere çekmek için çabalamaktadır. Bunlar yine çok düşük sıcaklıklarda (yaklaşık –250°C'de) tutulan malzemelerdir. Ancak bu sıcaklıklara, uzmanlaşmış bir laboratuvar haricinde de ulaşılabilir. Çalışma sıcaklıklarını kademeli olarak artırma ümidi, süperiletkenliğin arkasındaki mekanizmaya ilişkin temel kuramın geliştirilmesiyle suya düşmüş gözüküyordu çünkü bu mekanizma zaten ulaşılmış olandan daha yüksek sıcaklıklarda asla çalışamayacak gibi görünüyordu. Ancak 1980'lerin ortasında (devrimlerin âdeti olduğu üzere) eski kesin doğruları aniden yanlış çıkaran bir devrim oldu.

30 K'nin süperiletkenlik için mutlak sınır olduğunun açıklanmasından birkaç ay sonra Paul Chu, Maw Kuen We ve ekipleri, 1987 Mart'ında New York'taki bir toplantıda göreceli olarak ılık sayılabilecek 90 K'de süperiletkenlik ürettiklerini açıkladılar. Bir metal yerine baryum, bakır ve itriyum ile oksijeni birleştiren yeni bir seramik materyal kullanıyorlardı.

90 K atılımı açıklandığında alanda büyük ses getirdi. 30 K'lik sınırın yolun sonu olduğu ve potansiyel olarak çok kazançlı (aynı zamanda büyüleyici) oda sıcaklığında bir süperiletken olasılığının boş bir hayalden başka bir şey olmadığı yaygın bir şekilde kabul edilmişti. Şimdi ise 30 K sınırının yıkılmasıyla süperiletkenliği sürdürmek için kriyojeniyi gerektirmeyen bir sıcaklığa doğru büyük bir ilerleme kaydedilmişti.

Yeni simyacılar

Bu devrimin peşi sıra cereyan eden olaylar konvansiyonel malzeme biliminden çok simya alanında olup bitenlere benzetilmiştir. Ortaçağda kimya bir disiplin olarak ortaya çıkmadan önce simyacılar farklı karışımları tekrar tekrar ısıtıp soğutmayı deniyorlardı. Maddeler etkileşime girdikçe bu elementler ve bileşiklere ne olduğunu açıklamalarına yardımcı olacak bir model kurmamış ya da kuramamışlardı. Bunun yerine kombinasyonları öylesine deneyip ne olacağına bakarak metalleri birbirine dönüştürmek ya da ölümsüzlük iksirini bulmak gibi hedeflere ulaşmaya çalıştılar. Modern fizikte daha çok kullanılan yaklaşım önce neler olup bittiğini anlamak, daha sonra da bu anlayışı kullanarak süreci geliştirmektir. Fakat 1987 toplantısından sonra, genellikle itriyum gibi nadir toprak elementlerini içeren her türlü karışım, nasıl tepkime vereceklerini görmek için denenmiştir.

Nadir toprak elementleri, isimlerinin aksine doğada özellikle nadir bulunan elementler değildir; içlerinde ilk olarak tespit edilmiş oldukları mineraller doğada nadir bulunur. Karışımda nadir toprak elementlerini kullanmanın bariz bir mantığı vardı. İlk süperiletken seramik baryum, bakır, lantan ve oksijen içermekteydi ancak bu karışım sadece 30 K sınırına ulaşmıştı ve itriyuma geçmek, ani atılımın anahtarı gibi gö-

züküyordu. Hem Nobel'e hem de finansal başarıya ulaşma yarışında farklı kombinasyonları deneme çabaları, normal bir bilimsel çalışmadan ziyade bu simyacıların işi gibi gözüküyordu.

Ancak araştırmacılar karışımları oluşturan elementleri çılgınca bir tempoyla sürekli değiştirip dursalar da bir kılavuz ilkeyi göz önünde tutuyorlardı. Bir materyali basınç altına sokmanın süperiletkenliğin başladığı kritik sıcaklığı artıracağı zaten gözlenmişti. Bu, yüksek sıcaklıkta süperiletkenler üretmek için pratik bir araç olmasa da, materyalin yapısında atomları birbirlerine yaklaştırmak için bir yol bulmanın fononlar ile elektronlar arasındaki ilişkiyi artıracağı ve iletkenliği "süper" hale getireceğini akla getiriyordu. Bunu yapmanın yollarından biri, aksi halde daha küçük bir yapıya sahip olacak olan kafese daha büyük atomları dahil etmekti.

Helyumdan kurtulmak

Bir yıl içerisinde orijinal karışımdaki baryum veya lantanın yerine talyum, stronsiyum ve bizmut kullanılan materyaller için 125 K civarında kritik sıcaklıklar bildirilmeye başlanmıştı. Ayrıca ara sıra 250 K'lere (pratikte oda ya da en azından derin dondurucu sıcaklığı) kadar sıcaklıklara ulaşan heyecan sıçramaları da oluyordu. Bu ilk gözlemler sadece bir defa yapılıyor, ancak tekrarlanmaları mümkün olmadığında heyecan sönüyordu. 90 ila 125 K arasında yeni bir platoya ulaşılmış gözüküyordu. Bu çok daha önemli bir sınırdı.

Bunlar oda sıcaklığında iş gören süperiletkenler olmasalar da ve süperiletken enerji nakil hatlarının kurulmasında ya da evlerimizdeki tesisat veya aygıtlarda kullanılabilecek gibi gözükmeseler de 30 K ve daha düşük sıcaklıklar gerektiren geleneksel süperiletkenler karşısında devasa bir avantaja

sahiptiler. Bu sıcaklıklara inebilmek için gerekli ortam olan sıvı helyumu üretmek çok pahalıdır. Buna karşın sıvı azotun elde edilmesi en az 100 kat daha ucuzdur. Örneğin pratisyen hekimlerin uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılabilecek kadar ucuzdur. Sıvı azot 77 K civarında kaynar. Bu yeni süperiletkenler iş görmek için sadece sıvı azota ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte kriyojenik depolamanın gerektirdiği ağır işlerin pek azının yapılmasını gerekli kılmak gibi bir avantaja sahiptirler.

Yeni bir mekanizma

Bu alanda, yüksek sıcaklıklarda süperiletken materyaller üretme yarışı dışında bir başka yarış daha gözlenmektedir: Düşük sıcaklıkta süperiletken olan bir metale Cooper çiftinin kazandırdığından daha farklı şekilde süperiletkenlik kazandırdığı düşünülen bir süreç mevcuttur; söz konusu ikinci yarış bu süreci açıklayacak bir kuram geliştirmek için yapılmaktadır ve henüz sonuçlanmamıştır. Klasik baryum-bakır-itriyum-oksijen materyalinin ($YBa_2Cu_3O_7$) özellikle tuhaf bir yapısı olduğu zaten epeydir biliniyordu. Metaller gibi düzenli bir kafessi yapıya sahip olmayan bu seramik, üst üste binmiş bakır/oksijen tabakalarından oluşur, baryum ve itriyum atomlarını aralarında sıkıştıran bakır ve oksijen zincirleri bu tabakaları birbirine bağlar. Bu yapı, akımın düzlemler boyunca mı ya da düzlemlere dik olarak mı geçtiğine bağlı olarak oda sıcaklığında elektriğe farklı dirençler göstermek gibi fiziksel acayiplikler üretmekteydi. Katmanlar arasındaki bir çeşit tünelleme mekanizmasının Cooper çiftlerinin ilerleyişini hızlandırması mümkündü.

Ancak bu yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin nasıl çalıştığına dair yaygın olarak kabul gören bir açıklama henüz mev-

cut değildir (bu alanda çalışan fizikçiler 90 ila 125 K'yi yüksek sıcaklıklar olarak kabul ederler). Bu materyallerin karmaşık yapısını anlamak ve süperiletkenliğin nasıl sürdürüldüğünü açıklayacak bir kuram üretmek bugün hâlâ başlıca araştırma sahalarından biridir. Elimizdeki en iyi açıklama fononların konvansiyonel düşük sıcaklık süperiletkenlerinde oynadığı rolün yerini (aslında bir manyetik mekanizma etkisi olan) dönüş salınımlarının almış olmasıdır. Ancak bu kesin olmaktan henüz çok uzaktır.

Oda sıcaklığındaki süperler

Kuramcılar bir açıklama üzerinde çalışırken, "oda sıcaklığında süperiletkenliğin" gözlemlenme olasılığı her geçen gün artmaktadır. Bu olup bitenler 1980'lerde vuku bulan soğuk füzyon sansasyonunun süperiletkenlik alanında yaşanan bir benzeri olabilir fakat 30 K bariyerinin aşılması da aynı ölçüde olasıdır. Söz konusu sansasyon şuydu: Stanley Pons ve Martin Fleischmann oda sıcaklığı ve basıncında nükleer füzyon ürettiklerini iddia etmiş ama sonra deneylerinin tekrarlanmasının her zaman mümkün olmadığını keşfetmişlerdi.

İncelenen olasılıkların güzel bir örneği, 2013'te Japonya'da Tokai Üniversitesi'nde belgelenmiştir. Araştırmacılar HOPG (hayli yönlendirilmiş pirolitik grafit) olarak bilinen bir materyal kullanmaktaydı. Bu, katmanları arasında kendisine olağandışı davranışını veren ekstra bağlarıyla karbonun konvansiyonel grafit formuydu. Pirolitik karbon, mıknatısların süperiletkenlerin üzerinde yaptığı gibi sabit mıknatısların üzerinde havada durabilen az sayıdaki materyalden birisidir, grafit levhalarından oluşan düzlem boyunca termal olarak son derece iletkendir ve oda sıcaklığındaki en manyetik materyaldir.

Tokai deneyinde iki HOPG plakası organik bileşikler heptan ve oktandan oluşan bir karışıma batırılmış ve numunelerin direnci ölçülebilir seviyelerin altına düşmüştü. Deneyi yürütenler bileşikleri tutan halka şeklinde bir konteynerden 50 gün boyunca bir akımı azalmadan geçirmişlerdi. Araştırmacıların dediği gibi, "Bu sonuçlar alkanları bir grafit yüzeyine temas ettirerek oda sıcaklığında süperiletken üretilebileceğini" gösteriyordu. Henüz çok erken, ancak bu deneyler gelecek için umut vaat etmektedir.

Metamateryal çılgınlığı

Diğer bilim insanları oda sıcaklığındaki süperiletkenlere farklı bir açıdan yaklaşmakta olup görünmezlik pelerinlerinin yapımında kullanılan özel malzemelerin aynılarının dirençsiz dünyayı oluşturmayı mümkün kılacağını umut etmektedir. Bu özel malzemelere "metamateryal" adı verilmiştir. Araştırmacılar bu materyalleri kullanarak birtakım maddelerin ışıkla, sesle veya elektromanyetizmayla nasıl etkileşime girdiğini araştırırlar.

Görünmezlik metamateryalleri genellikle negatif kırılma indisi olan malzemelerdir. Kırılma ışığın bir ortamdan bir diğerine geçerken eğilmesidir; bir kalemin bir bardak suya konulduğunda eğilmiş gibi gözükmesidir. Negatif kırılma indisi ışığın normalin tersi yönde kırılması, bir nesnenin dışına doğru kırılarak onu gizleyebilmesi (bir görünmezlik pelerini oluşturması) anlamına gelir. Ancak metamateryallerin bir numaraları daha vardır.

Towson Üniversitesi'nden Vera Smolyaninova ve Maryland Üniversitesi'nden Igor Smolyaninov, metamateryallerin bazılarının, ilk kez Rus fizikçi David Kirzhnits tarafından 1973'te türetilen bir süperiletkenlik kuramının sağladığı bakış

açısıyla çok ilgi çekici hale gelen bir özellikleri olduğunu fark etmişlerdir. Bu, elektronların süperiletkenliği destekleme becerisini materyalin dielektrik tepkisi olarak bilinen bir özelliğine bağlar. Dielektrik tepki ne kadar düşükse elektronlar o kadar iyi etkileşime girer. İlkesel olarak ihmal edilebilir hatta negatif dielektrik cevabı olan bir metamateryal üretilebilir. Bu, Smolyaninovların ilgisini çekmiştir.

Umut edilen şey, hem düşük sıcaklıklarda bir süperiletken olarak iş görebilecek cıva veya kurşun gibi bir metalin hem de dielektrik bir materyalin (bir yalıtkan olan ancak zıt kutuplarında farklı yüklere sahip olması için polarize edilebilecek bir madde; akıllarındaki madde stronsiyum titanattır) katışıklılıklarını içeren özel bir metamateryal üreterek şu anda mümkün olandan çok daha yüksek sıcaklıklarda elektron çiftlerinin üretimini mümkün kılmaktır. Oda sıcaklığına erişemeyebilir (hiçbir işe yaramayabilir, bu hâlâ sadece bir teoridir) fakat süperiletkenliği günlük yaşama getirmek için bir materyal tasarlamakta önemli bir adım olacaktır.

Bu arada süperiletkenlere 100 yıldan uzun bir süredir sahibiz ve onları kriyojenik sıcaklıklarda tutmanın yarattığı sınırlamalarla bile asla kullanılmamış olmaları şaşırtıcı olurdu. Süperiletkenler elektronik kadar kullanışlı olmasalar da yaşamlarımızda önemli bir rol oynamaya başlamışlardır.

BÖLÜM 9

HAVALANAN TRENLER VE SOĞUK SQUID

10 Eylül 2008'de CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) çalıştırıldığında dünya nefesini tutmuştu. Bazı felaket tellalları minyatür kara delikler veya bildiğimiz evreni yok edebilecek tuhaf bir madde yaratacağını iddia ediyordu. İyimserler ise peşinden çok koşturulan Higgs bozonuna derhal ulaşacağımızı düşünüyordu. Ancak hakikat düş kırıklığı yarattı. Dünya yok olmadı ve testler ertesi gün de devam etti. Ancak BHÇ çalıştırıldıktan dokuz gün sonra işler ters gitti.

Felaketi söndürmek

Bir elektrik arızası, BHÇ'nin neredeyse ışık hızında hareket eden protonlarını yolda tutmak için kullanılan devasa süperiletken mıknatısları soğutmak için kullanılan sıvı helyumun sızıntı yapmasına sebep oldu. Mıknatıslar birden süperiletken fazdan çıktı. "Sönme" olarak bilinen bu hızlı değişim, devasa akımlar birden dirence maruz kaldığından ani bir ısı sıçraması üretti ve kalan helyumun patlamasına yol açtı. Sonuçta 50 mıknatıs hasar gördü ve onarılmaları bir yıldan uzun sürdü. Bu, özünde süperiletkenlikle ilgili bir kazaydı.

BHÇ'deki büyük mıknatıslar süperiletken içeren en büyük araçlardır, ancak içerisinde süperiletkenlerin kullanıldığı teknolojilerin sadece küçük bir bölümünü temsil ederler. Bunların bazılarının günlük hayata etki etme potansiyeli çok daha yüksektir.

İlk umutların muhtemelen abartılmış olduğu doğrudur. Onnes süperiletkenleri ilk defa keşfettiğinde çağdaşları, bir ülkenin bir ucundan diğerine devasa akımları hiç kayıp olmaksızın taşıyacak süperiletken enerji nakil hatları hayal etmişlerdi. Ancak kabloları çok düşük sıcaklıklarda tutma zorunluluğunun, akımlar belirli bir seviyeye ulaştığında süperiletkenliğin güçlü manyetik alanlar oluşturarak kendi kendini engellemesiyle birleşmesi, bu tür uygulamaların günlük hayatımıza girmesini engellemiştir. Transistörler ve lazerlerin aksine evlerimizde henüz süperiletkenler yok. Sadece birtakım özel uygulamalarda uzmanlar tarafından kullanılıyorlar. Ancak bu uygulamalar yine de etkileyicidir.

BHÇ'nin veya az sonra bahsedeceğimiz manyetik hava destekli trenler gibi diğer uygulamaların gerektirdiği türden mıknatıslar üretmek için, ilk süperiletkenlerin çok güçlü manyetik alanlara maruz kaldıklarında süperiletkenliklerini kaybetmeleri sorununun çözülmesi gerekiyordu. Bazı alaşımların farklı bir tür süperiletkenlik davranışı sergilediği bulunmuştu. Bu "tip II süperiletkenler"de manyetik alanın materyalin içinden geçmesine izin veren ("demet" adlı) bölgeler bulunur ve bu bölgelerde materyal bir süperiletken olmayı bırakır. Ancak demetlerin etrafı süperiletkenliği koruyan madde ile çevrilmiştir. Materyalin içindeki katışıklılıklar bu demetleri kıpırdayamaz hale getirir, bir çeşit elektrik direnci oluşturacak hareketlerini yapmalarını engeller. Sonuç, endüstriyel güçte devasa mıknatıslar için gereken türden akımlarla başa çıkabilecek bir süperiletkendir.

Kuantum manyetik şişe

İnşa edilmiş en büyük makine olan BHÇ'nin süperiletken mıknatısları kullanmak isteyen mühendisler için en dramatik zorluğu çıkarması beklenebilir, ancak BHÇ'nin sorunları, bir "tokamak" inşa etmek için gerekenlerle karşılaştırıldığında solda sıfır kalır. Tokamak Rusça kabaca "manyetik bobinli toroidal oda" anlamına gelen ifadenin kısaltmasıdır (kısaltmanın orijinalinin tam olarak ne olduğu tartışmalıdır). Nükleer füzyon için gerekli olan bir manyetik sınırlama reaksiyon kabıdır. Nükleer füzyon ilkesel olarak Güneş'in güç kaynağıdır. Harika bir enerji üretme yöntemidir ve mevcut kaynaklarımızdan çok daha iyi bir enerji kaynağı olacaktır. Fakat füzyona dayalı elektrik santrallerinin icadını 60 yıldan uzun bir süredir beklemekteyiz ve 20 ila 30 yıl daha beklemek gerekecektir. Ne de olsa Güneş'in küçük bir modelini Dünya'da yapıp çalıştırmak son derece zor bir iştir.

Konvansiyonel nükleer fisyon elektrik santralleri ile karşılaştırıldığında füzyonun iyi yanı çok daha kolay elde edilen ve hiçbir nükleer atık üretmeyen yakıt kullanıyor olmasıdır. Ancak füzyondan faydalanmanın sorunlu tarafı yaklaşık 150 milyon °C sıcaklığa ulaşmış bir plazmayı (bir iyon karışımını) bir kabın içinde muhafaza etmenizi gerektirmesidir. Bu, Güneş'teki en yüksek sıcaklığın on katıdır ancak füzyon reaktörü, Güneş'teki sürece yardımcı olan devasa kütleçekim basıncına sahip değildir, tüm bu enerjiye füzyonun gerçekleşmesi için ihtiyaç duyar. Son derece sıcak plazma, içinde bulunduğu metal kaba temas etmemelidir, aksi halde plazmanın sıcaklığı aniden düşer ve metal kabın çeperleri ciddi hasar görebilir. Bu nedenle yüklü iyonlar, genellikle D-şeklinde bir kesiti olan simit (torus) biçimindeki reaksiyon odasını çevreleyen bir dizi güçlü mıknatıs ile yerlerinde tutulmalıdır.

İlk tokamaklarda göreli olarak az miktarda plazmayı yerinde tutmak için konvansiyonel elektromıknatıslar kullanılmaktaydı, ancak bir tokamak jeneratörünün üretilmesi için gereken manyetik alan gücüne ulaşmak bir dizi süperiletken mıknatısla mümkün olur. Fransa'nın güneyinde Cadarache'ta şu anda inşa edilmekte olan yeni nesil tokamak ITER 1/1 ölçekli değildir, ancak bir üretim versiyonunun yapılmasından önceki test reaktörlerinin sonuncusudur ve kendisinden sonra gelenler gibi süperiletken mıknatıslara sahip olacaktır. Süperiletkenler bu düşük karbon emisyonlu enerjinin üretiminde çok önemli rol oynayan bu adımın en önemli bileşenlerinden biridir.

ITER mühendislerinin karşısına çıkacak olan zorlukları hayal edin. Sadece korkutucu derecede sıcak bir iyon kütlesi yaratıp idare etmek zorunda kalmayacaklar, bu kütle aynı zamanda canlıymış gibi de davranacaktır. Bir plazma, sanki manyetik alandan kaçmaya çalışan bir canlıymışçasına kıvrılır ve döner. Reaktörü çalışır halde tutmak zaten çok zor bir iştir. Ancak bu korkunç sıcaklığı üretip plazmayı kontrol altında tutmak zorunda kalmanın yanı sıra mühendisler bu kaynayan cehennemi, mutlak sıfıra birkaç derece uzaklığa kadar soğutulan süperiletken mıknatısların hemen yanında tutmak zorundadır. Füzyonu gerçekleştirmek yeterince zor değilmişçesine, bu mıknatısları, bu kadar yüksek sıcaklıkların yakınında soğuk tutma ihtiyacı, tasarıma bir zorluk daha ekler. Ama süperiletken mıknatıslar kullanılmak zorundadır, çünkü 1/1 ölçekli, çalışan bir reaktörün bunlar olmadan yeteri kadar güçlü bir manyetik alan üretmesi mümkün değildir. Elektrik santrallerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmişlerdir.

Titreten tarama

ITER hâlâ geleceğe ait bir projedir, ancak süperiletkenler değeri denenmiş ve test edilmiş bir uygulamada, yani MRI tarayıcılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha doğru olarak nükleer manyetik rezonans olarak bilinen, ancak "nükleer" kelimesinin yarattığı olumsuz izlenim sebebiyle manyetik rezonans görüntüleme olarak yeniden adlandırılan MRI kuantum fiziğinden iki aşamada faydalanır: Güçlü manyetik alan yaratmak ve görüntü üretmek. Tarayıcı, ITER'dekilerin küçük ölçekli bir çeşidi olan süperiletken mıknatıslar sayesinde üretilen son derece güçlü manyetik alanlar gerektirir.

Tarayıcı vücut boyunca su moleküllerindeki hidrojen atomlarının çekirdeklerinde bulunan protonların kuantum dönüşlerini manipüle ederek çalışır. Taranacak olan kişi, protonların yönünü değiştirmek üzere ayarlanmış frekansa sahip hızla değişen bir manyetik alan üreten bir manyetik bobinden geçirilir. Alan kapatıldığında protonlar eski yönlerine döner ve vücudun içerisinden radyo frekansında elektromanyetik radyasyon üretir. Aslında su molekülleri, alıcı bobinler tarafından tespit edilen minik vericiler haline gelir. Sinyalin yerini üç boyutlu olarak tespit edebilmek ve tarayıcıdan geçerken vücudun kesitsel bir görüntüsünü oluşturmak için fazladan çeşitli manyetik alanlar kullanılır. MRI tarayıcıları normal ile anormal dokular arasında ayrım yaparak tümörleri tespit etmek için idealdir.

Bir MRI tarayıcısının ana bileşeni olan mıknatıs, genellikle sıvı helyumla 4 K'ye (–269°C) soğutularak bir süperiletken etkisi oluşturulur. Gradyan bobinler olarak bilinen ikincil elektromıknatıslar üç boyutlu bir görüntünün oluşturulması için manyetik alanı değiştirirler. Alan gradyanındaki değişiklikler bu bobinlerde hızlı genleşme ve büzülmelere sebep olarak gürültülü bir çekiç sesi çıkartırlar. Uygun bir ses yalı-

tımı yapılmadığında bobinler kalkış yapan bir jet uçağı kadar gürültü çıkartarak 120 desibele ulaşabilir.

Bir MRI tarayıcısı, süperiletkenliğin gündelik kullanıma en çok yaklaştığı yerdir. Belki hâlâ bir miktar nadirdir, ancak çoğumuz MRI tarayıcılarını işitmişizdir. Süperiletkenliğin uygulama sahaları günümüze dek, ne kadar önemli olsalar da, araştırma tesislerinin sınırları içinde kalmıştır. Ancak süperiletkenlik uygulamalarının yakın zamanda ayaklarımızı yerden kesmesi beklenmektedir. Hatta bu alanda en meşhur uygulama, bazı yolcu trenlerinin rayın üzerinde fakat raya temas etmeden yol almasını içerir.

Havalanan tren

Demiryollarının elimizdeki en iyi taşımacılık mekanizması olma potansiyelini içerdiğine hiç şüphe yoktur. Hava yollarının aksine demiryolları enerji kaynağı olarak düşük karbonlu elektrik kullanabilir, çok güvenlidir ve otomobil veya otobüs ile seyahat etmeyle karşılaştırıldığında çok daha etkili ve çevre dostudur. Demiryollarını sadece trenler kullanabildiği için kara taşımacılığının diğer tüm türlerinden çok daha hızlı çalışabilir. Yüksek hızlı trenler artık 250 km/s hızla hareket etmekte olup kısa mesafeli yolculuklarda (hava yollarının bürokrasisi ile karşılaştırıldığında bir tren size hedefinize doğrudan ulaştırabildiğinden) hava yollarıyla rekabet edebilir. Ancak konvansiyonel demiryolları erişebileceği pratik sınırlara ulaşmış gibidir. Maglev işe burada devreye girer.

Maglev manyetik havalanmanın (*magnetic levitation*) kısaltmasıdır. Hepimiz çocukken mutlaka mıknatıslarla oynamış ve aynı kutupların birbirlerini (kuzeyin kuzeyi veya güneyin güneyi) neredeyse sihirli bir şekilde itişini hissetmişizdir. Bu itme kuvveti, uygun bir yüzey üzerine dengeli şekilde yer-

leştirilen mıknatısın bu yüzey üzerinde süzülmesine olanak verir. Eğer bu mıknatısa bir tahrik mekanizması eklerseniz (tipik olarak bu da manyetizmaya dayalı olacaktır) raylarla temas etmediği için sürtünmeye maruz kalmayan, bu yüzden geleneksel trenden çok daha yüksek hızlara ulaşabilen ve çok daha sessiz olan yeni nesil bir treniniz olur. Ancak ağırlığı tonlarla ölçülen treni yerden kaldırmak konvansiyonel mıknatısların kapasitesini aşar. Süperiletkenler olaya burada dahil olur (yüksek sıcaklıkta çalışan bir süperiletken arayışının bu kadar önemli olmasının sebeplerinden biri de budur).

Deneysel birkaç maglev treni mevcuttur ve bu kitap yazılırken çalışmakta olan iki kısa hat mevcuttu, ancak henüz hiçbiri geniş çaplı demiryolu hizmetine açılmamıştı. Bir maglev treni demiryollarında dünya hız rekorunu çoktan kırmıştır: süperiletken mıknatıslar üretmek için sıvı helyum kullanan deneysel Japon treni MLX-02, 581 km/s'e ulaşmıştır. Ticari amaçlı ilk maglev (Tokyo, Nagoya ve Osaka'yı birbirine bağlayacak olan Chou Shinkansen) şu anda Japonya'da planlanmaktadır. Bu treni çalıştırmak basit bir iş değildir. İşler hale gelmesi 2045'i bulabilir ancak 500 km/s'lik bir hıza ulaşabilir. Trenin raylardan yaklaşık 10 santimetre yükselmesi beklenmektedir. Treni havaya kaldıracak helyum bazlı süperiletken mıknatıslar aynı zamanda treni hareket ettirecek mekanizmayı da çalıştıracaktır.

Maglevi düzeltmek

Maglev sürtünmenin dezavantajlarını ortadan kaldırsa da tren, saatte 400 kilometrenin üzerindeki hızlarda önemli bir sorun haline gelen hava direnciyle yüzleşmek zorundadır ve bu hızlarda enerjisinin yaklaşık %83'ünü boşa harcar. Ses de ayrı bir sorundur. Maglev treni konvansiyonel bir tren gibi

ray gürültüsü çıkarmasa da, hava içerisinden bu hızla geçmekle çıkan 90 desibellik (10 metre ötede çalışan bir dizel kamyonun çıkardığı sese eşdeğer) gürültü dayanılmaz bir sınıra ulaşır. Eğer bundan da yüksek hızlara ulaşılacaksa (teoride maglev 1000 km/s'lik hıza ulaşabilir) trenin, havası en azından kısmen boşaltılmış bir tünelde yol alması gerekecektir. Bu, çok uç noktada bir çözüm gibi gözükebilir ancak İsveç'teki bir metro sistemi için olası bir yaklaşım olarak önerilmiştir bile. Yeraltı hatları bu "vakum treni" yaklaşımına meyletmektedir.

Çok kısa zaman içerisinde demiryolu ağlarımızın maglev trenleriyle dolduğunu görecek değiliz. Birleşik Krallık'ta 2010'ların başlarında konvansiyonel bir yüksek hızlı tren hattının (HS2) inşa edilmesi konusunda kopan gürültülü politik kavga, bazı ülkelerin altyapıda büyük bir değişiklik yapmasının ne kadar zor olduğunu göstermiştir. Ancak Japonlar bu işe ayrılmış yüksek hızlı tren hatlarını inşa etmeye hazır olduklarını çoktan göstermişlerdir. Hava yolculuğu küresel ısınma sebebiyle giderek daha az rağbet gördüğünde ve oda sıcaklığında çalışan süperiletkenler keşfedilebilirse şüphesiz ki maglev alanında da benzer bir başarıya ulaşacaklardır.

Maglev potansiyel olarak doğa dostu bir ulaşım yolu olsa da (elektriğin nasıl oluşturulduğu ve soğutma gazının nasıl üretildiğine bağlı olarak) özellikle kamuoyunun "radyasyon" ile ilgili endişeler taşıdığı Çin'de bazı ekolojik hassasiyetlere yol açmıştır. Pek çok kişi "radyasyonu" nükleer reaksiyonların potansiyel olarak tehlikeli ürünleri (yüksek enerjili parçacıklar ve gamına ışınları) ile ilişkilendirdiğinden bu konuda kafa karışıklığı vardır. Ancak enerji nakil hatları ve baz istasyonlarından gelen elektromanyetik radyasyon (mevcut çevremizdeki çoğu sorunumuzun kaynağı) gamma ışınları gibi yıkıcı nitelikte değildir, sadece radyo frekansında yayı-

lan başka bir ışık türüdür. Son derece güçlü olan manyetik alanlara çok yakından maruz kalmanın beyni etkileyebileceği doğru olsa dahi bir maglev treninin yolcuları veya yakınından geçenler buna benzer bir etkiye maruz kalmazlar ve bu konuda endişe edilecek bir şey yokmuş gibi gözükmektedir. Ancak teknolojide bu kadar büyük bir değişikliğin pazarlanmasının ne kadar zor olabileceği ortadadır.

Süperiletkenliğin ulaşıma uygulanması konusunda en büyük yatırım trenler olsa da, gemiler için de süperiletken bir elektrik motoru üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Günümüzün mazotla çalışan gemi motorları çevreyi çok kirletmekte ve atmosferdeki CO_2 seviyesine kayda değer bir katkı yapmaktadır (saldıkları kirli partiküller güneş ışığını engellediğinden küresel ısınmayı yavaşlatıcı bir etkileri de vardır ancak böyle bir kirlilik hiç de arzu edilecek bir şey değildir). Öte yandan, mevcut elektrik motorlarının ölçeğini, okyanusu aşan bir gemiye uyacak kadar büyütmek kolay iş değildir. Yüksek sıcaklıkta (sıvı azot) süperiletkenlere dayalı mıknatıslar kullanan prototip motorlar test edilmektedir ve on yıl içerisinde ticari kullanıma açılacaktır.

Josephson'un kuantum dehası

Böyle uygulamaların akla gelmesi doğaldır çünkü BHÇ'nin dev mıknatısları ve MRI tarayıcıları gibi süperiletkenlerin en bilindik uygulamaları, süperiletkenlikten daha büyük ölçekte faydalanan büyük makinelerdir. Ancak bu kuantum fenomeninin en esnek kullanımlarından biri, ölçeğin küçük ucunda bir SQUID (mürekkep balığı) şeklini alır. Bu, denizde yaşayan bir omurgasız değil, Süperiletken Kuantum Parazit Cihazı'dır (Superconducting Quantum Interference Device). Bunları anlamak için ilk olarak, o zamanlarda bir yüksek li-

sans öğrencisi olan ve daha sonra çalışmalarıyla Nobel Ödülü kazanacak olan Brian Josephson'un 1962'de geliştirmiş olduğu bir kuantum cihazıyla, Josephson birleşimi ile tanışmamız gerekiyor.

Josephson fizik dünyasının sıra dışı karakterlerinden biridir. Diğer bilim insanlarının zaman kaybına yol açan, sözdebilim olarak gördükleri (su hafızası ve telepati gibi) pek çok fenomeni hayranlıkla kabul etmiş olduğundan yaşlılığında pek çok çağdaşı tarafından yerilmiştir. Buna rağmen yirmili yaşlarında Josephson'un fizik alanında çalışan en keskin akıllardan biri olduğuna şüphe yoktur. Birkaç yıl önce kendisini, zihin-madde birleştirme projesinde çalışmasına olanak veren Uygulamalı Matematik ve Kuramsal Fizik Bölümü'nde fahri bir konuma sahip olduğu Cambridge Üniversitesi'nde ziyaret etmeye gitmiştim.

Saçlarına tarak değdirmemek ya da konuşurken daima konuyu dağıtmak gibi kaçık bilginlere yakıştırdığımız niteliklerden bazılarına sahip olduğu izlenimini doğursa da, diğer fizikçilerin ona büyük saygı duyduğunu görmek ilginçti. Bunu Kuantum dolaşıklığı uzmanı Anton Zeilinger'in verdiği bir derse gidip Josephson'un yanına oturduğumda fark etmiştim.

Ancak 1960'larda Josephson çok daha hararetli ve azimli bir kişilikti. Hocalarının derste yaptıkları hataları hemen fark etmesiyle ünlüydü. Bunlardan biri olan Philip Anderson şöyle demişti: "[Josephson'un derste olması] rahatsız edici bir şeydi, çünkü sizi temin ederim her şey doğru olmalıydı, aksi halde dersten sonra bana doğrusunu açıklamaya gelirdi." Josephson, kendi adıyla anılacak birleşim haline gelecek olan keşfi yaptığında sadece 22 yaşındaydı ve 33 yaşında Nobel Ödülü'ne layık görülmüştü. Gençliğinde Josephson'u iş başında gören herkesi etkileyen şey, eksiksiz bir vizyona sahip

olması, mevcut kuramı alıp geliştirerek bir Josephson birleşimi inşa etmenin olası sonuçlarını içeren eksiksiz bir tanım vermesiydi.

Uzman bir patent avukatı Anderson'a "Josephson'un makalesi o kadar eksiksiz ki Josephson etkisininin değerli herhangi bir yönünün patentini almaya çalışan hiç kimse pek bir başarı elde edemeyecek" demişti. Ve bu, doktorasını tamamlamasına hâlâ iki yılı olan birisiydi. Fizikçilerin bakış açısına göre Josephson'un çalışması, süperiletkenliğin doğası hakkında temel bir içgörü sağlamış olduğu ve özellikle de bir süperiletkendeki elektron çiftlerinin fazının rolünü açıklığa kavuşturduğu için çok önemliydi. Ancak dışarıdan bakıldığında bu, süperiletkenlerin pratik uygulamaları için yeni olasılıklar oluşturmuştu.

Peki SQUID'leri hayata geçiren bu etki nedir? Bir Josephson birleşimi, aralarında bir yalıtkan veya süperiletken durumunda olmayan bir iletken olabilen bir bariyer olan bir süperiletken çiftinden meydana gelir. Kuantum parçacıklarının bir bariyer içinden nasıl tünellenebileceği aşağı yukarı anlaşılmıştır (*bkz.* sayfa 40) Ancak Josephson, Cooper elektron çiftlerinin de bazı koşullarda bariyer içerisinden tünellenebileceğini tahmin etmişti. Josephson aynı zamanda, fazın zamanla değiştiği alternatif akımda, frekans gerilim ile doğrudan ilişkili ve frekansın ölçülmesi gerilimin ölçülmesinden çok daha kolay olduğundan, birleşimin son derece hassas bir gerilim ölçüm cihazı olarak iş göreceğini belirtmişti.

Josephson birleşimleri, kuantum seviyesinde işlem yapan mekanizmalardan (*bkz.* sayfa 222) dijital fotoğraf makinelerinde kullanılan yük bağlaşık aygıtların çok geniş spektrumlu eşdeğerlerine dek çok sayıda uygulamada karşımıza çıkmakta olup astronomi uygulamaları için idealdirler. Ancak bu saf kuantum etkisinin günümüzdeki en yaygın uygulaması

SQUID, yani süperiletken kuantum parazit cihazıdır. Bu cihazda, manyetik alandaki değişimlerden ileri gelen en küçük bir akımın dahi birleşim üzerinde tespit edilebilen bir etkisi olacağından, SQUID etrafındaki manyetik alanlarda meydana gelen çok küçük değişiklikleri tespit etmek için bir Josephson birleşimi kullanılır.

Günümüzde SQUID'ler, gelişimlerinin ilk aşamalarındaki lazerlere benzemektedir. Lazerlerin faydalı olacakları daha en başından belliydi, ancak spekülasyon ile gerçeklik arasında büyük bir boşluk mevcuttu. Lazerlerin yola gelmeleri ve bizim onları nerelerde kullanabileceğimizi fark etmemiz için bir süre geçmesi gerekmiştir. Aynısı SQUID'ler için de bir dereceye kadar geçerlidir, ancak beyin tarafından üretilen manyetik alandaki küçük kaymalardan sinirsel aktivite tespit etmek gibi alanlarda ve bazı MRI tarayıcısı türlerinde etkilerini göstermeye başlamışlardır bile. Şaşırtıcı bir gelişim alanı ise, bu alanda çalışanların UXO olarak adlandırdığı patlamamış savaş malzemelerinin (daha resmi bir deyişle "kaygı verici mühimmat ve patlayıcıların") tespit edilmesidir. Bomba ve top mermilerinin yüzde 10 ila 15'i infilak etmez ve düştüğü yerde kalıp uzun süreli bir tehdit oluşturur.

Sorunun ne kadar uzun vadeli olduğu, Avrupa'da hâlâ her yıl İkinci Dünya Savaşı'ndan kalan binlerce UXO bulunmasından anlaşılabilir. Savaş zamanında infilak etmeyen malzeme seviyesi yüzde 25'in üzerindeydi. Tabii ki yakın tarihte savaşa sahne olan arazilerde ve artık askeri bölge olarak kullanılmayan eski askeri eğitim alanlarında büyük miktarda patlamamış savaş malzemesi mevcuttur. Sadece ABD'de UXO'ların dağılmış olduğu en az 40.000 kilometrekarelik alan mevcuttur.

İstenmeyen bu artıkları tespit etmek için basit metal detektörlerden karmaşık manyetik alan monitörlerine kadar çeşitli

yöntemler kullanılmıştır ancak manyetik alanlardaki değişimi tespit etmekte, altlarındaki Dünya'nın manyetik alanının tam gradyanını ölçerek anormal nesnelerin şeklinin ve konumunun eşi benzeri olmayan açıklıkla belirlenmesine olanak veren yeni cihazlardaki SQUID'in hassasiyetiyle hiçbir şey karşılaştırılamaz. Bu aşırı hassasiyet sayesinde detektörün UXO'lara, konvansiyonel bir manyetometre kadar yakın olması gerekmez, bu sebeple de yeraltı suları ve yeraltında büyüyen bitkilerden çok etkilenmez. Yüksek sıcaklıkta süperiletken kullanılarak ekipman hem karada hem de su altında UXO'ları başarıyla tarayacak şekilde ayarlanabilir. Bu teknoloji şu anda test aşamasındadır, ancak kısa süre içerisinde eski savaş meydanlarında ve tatbikat bölgelerinde yaygın olarak görülmeye başlanacaktır.

Herhalde SQUID'lerin olası kullanım alanlarının sadece küçük bir kısmına değinmiş olduk. Diğer tüm süperiletken cihazlar gibi, eğer oda sıcaklığında çalışan bir süperiletken yapılabilirse çok daha yaygınlaşacaklardır. Bahsedilmeye değer son bir uygulama da tarayıcı SQUID mikroskobudur. Bu, taranacak olan alan üzerinde bir SQUID'i sistematik olarak hareket ettirerek bir resim oluşturmak için manyetik alandaki değişimleri kullanır. Bu şekilde kısadevreleri kontrol etmek ve devrenin beklendiği gibi çalıştığından emin olmak için entegre bir devreyi taramak mümkün olabilir. SQUID taranacak olan nesneyle doğrudan temas etmez, böylece numune SQUID'in gerektirdiği kriyojenik sıcaklıklar ve düşük basınç yerine oda sıcaklığında ve havada tutulabilir ve süreç numuneye zarar vermez.

Süperiletken kanalizasyon

Süperiletkenleri güçlü elektronik cihazlar ve tarayıcılarda bulmak şaşırtıcı olmayabilir, ancak süperiletkenlik uygulama-

larının son örneği, SQUID'in inceliğinden bir milyon fersah uzaktadır. Bu uygulama atık su arıtımıdır. Dünyamızda bol miktarda su var ama içme suyu kıtlığı yaşanıyor. Bu ciddi bir çelişki ama bir çözümü de olmalı. Dünyanın su kaynakları bugün hayatta olan her bir kişi başına yaklaşık 200.000.000.000 litre su içeriyor.

Tüketim açısından bakıldığında günde 5 litre su içtiğimizi varsayarsak gezegendeki suyun 100 milyon yıldan fazla dayanması gerekir. Ve bu hesap su tüketilip biterse geçerlidir. Oysa tükettiğimiz suyun büyük kısmının kısa süre zarfında çevreye geri döndüğünü biliyoruz. 5 litre elbette sadece doğrudan tükettiğimiz suyu temsil eder. Batılı tipik bir tüketici, günde 10.000 litre su tüketiminden sorumludur. Bu tüketim kısmen yıkanma, bahçe sulama ve tuvalette sifon çekme sebebiyledir, ancak satın aldığımız ürünler ve yediğimiz besinlerin üretimindeki dolaylı kullanım da buna katkıda bulunmaktadır. Sadece bir hamburgerin üretimi için yaklaşık 3.000 litre su gerekirken 1 kg kahve için 20.000 litre su gerekir. (Ancak bu miktarın da büyük kısmı geri dönüşecek, üründe kalmayacaktır.)

Sorun elbette sadece suyun mevcut olmamasından değil, aynı zamanda temiz içme suyunun ihtiyaç sahiplerinin kolayca erişebileceği yerlerde bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Bu muhtemelen su kıtlığını bir enerji sorunu haline getirecektir. Suyu temizlemek, tuzunu gidermek, tozunu toprağını uzaklaştırmak ve ihtiyaç duyulan yere taşımak için enerji gereklidir. Süperiletkenlik bunun üstesinden gelmekte bir rol oynayabilir. Atık su arıtma tesislerinin inşası hem pahalıdır, hem de maliyet açısından etkin olması için büyük ölçekli olmalıdır. (Endüstriyel bir tesiste kullanılmak üzere arıtılacak atık suyun kanalizasyondan ya da herhangi bir

akarsudan alınacak olması bir şeyi değiştirmez.) Daha küçük ve yerel bir sistemin daha kullanışlı olacağı pek çok durum mevcuttur. Süperiletkenler su arıtmaya konvansiyonel bir arıtma tesisiyle karşılaştırıldığında hem mali açıdan daha verimli, hem de daha derli toplu bir çözüm sunmaktadır. Üstelik bu çözüm daha hızlı çalışmaktadır.

Bu işlemde, suda süspansiyon halinde bulunan materyali ayrıştırmak için güçlü bir süperiletken mıknatıstan faydalanılır. Manyetik metalleri ayrıştırmak tabii ki kolaydır, ancak geri kalan maddelerin (tipik olarak lağım ve kirli suda bulunan şeylerin) bu yöntemle ayrıştırılması mümkün değildir. Ancak suya ferromanyetik adsorban olarak bilinen bir kimyasal eklenerek bu maddeler, manyetik alanların erişebileceği hale getirilebilir. Süspansiyon halindeki parçacıklar adsorban materyale yapışır, mıknatıslar tarafından sudan çıkarılır ve geriye sadece temiz su kalır. Yeteri kadar güçlü bir manyetik alan elde etmenin tek yolu süperiletkenler kullanmaktır.

Dahası var

Bu örnekler süperiletkenlerin gelecekteki kullanım alanlarının sadece basit bir örneğidir. Süperiletken kablolar üzerinde kayda değer miktarda araştırma yürütülmektedir. Görmüş olduğumuz gibi, daha Onnes'in zamanında bir elektrik şebekesinin karşı karşıya olduğu en büyük sınırlamanın iletimdeki kayıp (kablolardaki direnç yüzünden kaybedilen enerji) olduğu fark edilmişti. Süperiletkenliği bozan manyetik alanı yaratmadan yüksek bir gerilim taşıyabilecek süperiletken kablo tasarımları mevcut olsa da konvansiyonel bir kabloyla karşılaştırıldığında çok pahalıdırlar ve kullanışlı olmaları için oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta işlev görebilecek bir süperiletkene ihtiyaç duymaktadırlar.

Ancak bu, süperiletken enerji depolanması gibi ciddi bir araştırma alanıdır. Örneğin güneş ve rüzgâr gibi temiz kaynaklar, elektriği ihtiyaç duyulduğu anda üretememek gibi ciddi bir dezavantaja sahiptir. Büyük miktarda enerjinin ihtiyaç duyulan ana kadar depolanması da çetrefilli bir iştir. Muhtemelen elimizdeki en iyi çözüm, enerjiyi suyu yüksekteki bir rezervuara pompalamak için kullanmak, daha sonra da bu suyu ihtiyaç anında hidroelektrik üretmek için kullanmaktır. Ancak özellikle Japonya ve Kore'de enerjiyi ihtiyaç duyulana kadar manyetik bir alan olarak süperiletken bir bobinde depolamak için çalışmalar yapılmaktadır. Bunlar su depolamaya göre kayda değer şekilde daha verimlidirler ve depolama ve boşalmaları çok hızlıdır, ancak henüz göreli olarak küçük bir ölçekte çalışabilmektedirler.

Kuantum parçacıkları ile işlem yapmak

Süperiletkenlik mutfağınıza henüz sızmamış olabilir (bunun için oda sıcaklığında işlev gören süperiletkenleri beklemek gerekecektir) ancak hayatlarımızda önemli bir rol oynamaya başlamıştır bile. Fakat kuantum fiziğinin gündelik hayatta kullandığımız önemli bir teknoloji ürününü çok farklı bir hale sokabilecek havalı bir uygulama alanı daha vardır. Bilgisayarlar neredeyse hepimizin hayatında önemli rol oynuyor. İnternette dolaşmak, yabancı bir şehirde yol bulmak ya da kitap yazmak için bilgisayar kullanıyoruz. Bir bilgisayara hiç dokunmayanlar bile içlerinde bilgisayar bulunan çamaşır makinelerini, arabaları ve fotoğraf makinelerini kullanıyor. Elektronik aygıtlar olan bu bilgisayarlar kuantum cihazlarıdır. Bilgisayarları, kuantum fiziğini çalışma şekillerinin merkezine yerleştirecek şekilde kullanma olasılığı da tetikte beklemektedir. Ancak bilgisayarlarla tanışmadan önce Einstein'ı içinden çıkılmaz bir duruma neyin soktuğunu anlamamız gerek.

BÖLÜM 10

ÜRKÜTÜCÜ KARMAŞIKLIK

Kuantum kuramının belki de en endişe verici yanı, Albert Einstein'ın ondan nefret etmesiydi. Einstein hata yapamayacak birisi değildi; yanılabilirdi ve yanılmıştı da. Ancak Einstein gibi bir bilim insanı bir kuramdan hoşlanmamışsa bu hafife alınacak bir mesele değildir.

Tanrı zar atmaz

Kuantum fiziği alanında önde gelen bir rolü olan, az sonra bahsedeceğimiz Kuzey İrlandalı fizikçi John Bell bir defasında şöyle demiştir: "Bu konuda Einstein'ın entelektüel anlamda Bohr'dan çok çok daha üstün olduğunu hissetmiştim: Neye ihtiyaç duyulduğunu açık bir şekilde gören adam ile entelektüel gelişmeye karşı çıkan adam arasında devasa bir uçurum vardı." Einstein'ın haklı olup olmadığını test etmeyi mümkün kılacak olan Bell, Einstein'ın safını tutuyordu.

Görmüş olduğumuz gibi Einstein'ın ışığın kuantum doğası ile bir alıp veremediği yoktu (zaten bunun keşfinden büyük oranda kendisi sorumluydu). Ancak tüm gerçekliğin altında yatan kuantum olaylarının temelinde rasgelelik ve olasılığın bulunduğunu kabul etmeyi reddediyordu. Yeterince deri-

ne bakıldığında kuantum parçacıklarına, Bohr, Heisenberg, Schrödinger ve yandaşlarının bulanık olasılıkçı görüşünün aksine gerçek, sabit değerler verecek olan "gizli değişkenler" bulunacağından emindi.

Bu kanıya varan Einstein olasılık yorumunun ardındaki adam olan arkadaşı Max Born'a 1926'da şunları yazmıştı: "Kuantum mekaniği kesinlikle etkileyici. Ancak içimden bir ses asıl meselenin başka olduğunu söylüyor. Kuram bize çok şey söylüyor, ancak bizi 'ihtiyar'ın sırrını çözmeye biraz daha yaklaştırmıyor. Her halükarda ben, O'nun zar atmadığına inanıyorum."

Einstein'ın ima ettiği şeyi anlamak için yazı tura attığınızı hayal edin. Parayı havaya atıyorsunuz, bir elinizle tutup öteki elinizin üstüne koyuyorsunuz ama elinizi paranın üstünden çekmiyorsunuz. Normal bir yazı tura atışı. Bu noktada, paranın hileli olmadığını varsayarsak üste bakan yüzün yazı veya tura olma olasılığı yüzde 50'dir. Ancak gerçekte paranın sadece bir yüzünün üste baktığını biliyoruz. Hangisi olduğunu henüz bilmiyoruz ancak bu bilgi, "gizli bir değişken" olarak sistem dahilindedir. Kuantum ekibine göre bir kuantum parçacığı bundan tamamen farklıdır. Siz ona bakmadan önce haller çakışmaktadır. Herhangi bir değeri yoktur, yazı veya tura (veya olası değerler her neyse) değildir, belirli bir sonuç verecek sadece iki olasılık mevcuttur.

Einstein Bohr'u bozuyor

Einstein mektubunda Born'a birtakım şeylerden yakınsa da (Schrödinger'in denkleminin olasılıkları temsil ettiği yorumunun yapılmasından büyük ölçüde Born'un sorumlu olduğu göz önüne alındığında bunda haklıydı) asıl saldırısı, kuantum kuramına ilişkin giderek yaygınlaşan görüşün "elebaşı"

olan Niels Bohr'u hedef alıyordu. Kuramın genel olarak kabul edilen yorumu, Bohr'un çalışmalarını Danimarka'da yürütmesinden ötürü "Kopenhag yorumu" adını almıştı. Einstein kısa süre sonra derdini anlatmanın bir yolunu buldu. Fiziğin ileri gelenleri 1911'den beri Solvay Kongreleri adı verilen konferanslarda bir araya gelmekteydi. Bu konferansları, kendi fikirlerini zeki bir dinleyici topluluğuna duyurmak isteyen Belçikalı sanayici Ernest Solvay başlatmıştı, ancak Solvay sessizce kenara itilmiş ve alanın ağır topları harika bir bilimsel kongre ile baş başa kalmıştı. Hem 1927'de, hem 1930'da Einstein Bohr'un yakasına yapıştı ve kuantum kuramının yetersizliklerini göstereceğini umduğu bir dizi düşünce deney sundu.

Bohr bu tehditlerin bazılarını hemen savuşturdu. Biri hakkında şunları söylemişti: "Çok zor bir durumda olduğumu hissediyorum çünkü Einstein'ın tam olarak ne demek istediğini anlamadım. Şüphesiz ki bu benim hatam." Diğerleri üzerinde gün boyunca veya endişe verici bir tanesi üzerinde tüm gece boyunca çalışmak zorunda kalmıştı ve kahvaltı esnasında, tatmin edici bir ironi hissiyle Einstein'ın yanılmış olduğunu, çünkü genel göreliliğin öngördüğü kütleçekiminin deneyin üzerinde yapacak olduğu etkiyi dikkate almamış olduğunu, zamanın daha yavaş akmasına sebep olarak Einstein'ın kuantum kuramına meydan okuyacağını umduğu etkiyi dengeleyeceğini söylemişti.

EPR paradoksu

1930 Kongresi'nden sonraki beş yıl boyunca Einstein konu hakkında sessiz kaldı ve Bohr, saldırıların sonunun geldiğini umut etmiş olabilirdi. Ancak Einstein 1935'te, kuantum güvercinlerinin arasına kara kedi sokacağını ve kuantum kura-

mındaki bir hatayı nihai ve kesin olarak göstereceğini umduğu bir makale yayınlamıştı. Einstein'ın farkında olmadığı şey, tanımladığı etkinin kuantum fiziğini sadece aklamakla kalmayıp modern kuantum kuramının temel taşlarından biri haline gelerek etkileyici pratik uygulamalarının da olacağıydı.

Makaleye acemice "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanik Tanımı Eksiksiz Kabul Edilebilir mi?" adını vermişti, ancak makale daha sonra evrensel bir şekilde yazarlarının ilk harfleriyle bilinecekti. Einstein'a iki genç fizikçi Boris Podolsky ve Nathan Rosen katılmıştı ve makale EPR olarak anılacaktı.

EPR, içinde farklı yöne doğru hareket eden eşit iki parçaya bölünen bir parçacığın olduğu bir düşünce deneyinden söz eder. Kuantum kuramına göre bir süre sonra parçacığın örneğin momentum veya konumu belli olmayacaktır. Bunun yerine, sadece bir gözlem yapıldığında gerçek bir değer haline çöken bir olasılık dizisi bulunacaktır. Düşünce deneyi bir parçacık üzerinde, birbirlerinden çok uzaklaştıklarında bir ölçüm yapıldığını hayal eder. Mesela momentumu ölçelim. Momentumun korunumu bize, aksi yönde ilerleyen diğer parçacığın, tam olarak aynı momentuma sahip olması gerektiğini söyler. Ancak gözlem yapılana kadar bu değerler sabit olmaz. Öyleyse uzaktaki parçacık nasıl oluyor da momentumunun hangi değere sahip olması gerektiğini hemen buluyor?

Makale konum için de benzer bir argüman öne sürülebileceğini iddia ediyordu. EPR'nin, Belirsizlik İlkesi'ne bir itiraz olduğu konusunda kafa karışıklığına yol açtığı için bu iki ölçümü kullanması talihsizlikti. Aslında makale her ölçümü ayrı ayrı ele almıştı (düşünce deneyinin sonraki versiyonları farklı ve genellikle daha basit bir kuantum döngüsü kullanmıştı). Ancak kullanılan ifadeler biraz yanıltıcıydı. Einstein'ın

bu zamanlarda İngilizcesi çok iyi değildi ve kelime seçimi için ortaklarına güveniyordu. Makalede kafa karıştırıcı iki özelliğin neden kullanıldığı sorulduğunda Einstein Schrödinger'e, "umurumda değil" anlamına gelen "Das ist mir Wurst" cevabını vermişti.

Artık yerellik yok

EPR'nin yazarlarının varmış olduğu sonuç kuantum kuramının ya eksik olduğu (gerçek olasılıklar yerine, henüz farkına varılmamış gizli değerler olduğu) ya da evrenin olayları yerel ve gerçek olarak sınırladığını varsaymanın mümkün olmadığıydı. Eğer kuantum kuramı doğru ise, Einstein'ın "uzaktaki ürkütücü eylem" adını verdiği şey doğru olmalıydı: Birbirlerinden uzakta bulunan iki parçacık, Einstein'ın görelilik kuramına ve hiçbir şeyin ışıktan hızlı seyahat edemeyeceği varsayımına açıkça aykırı düşerek, bir şekilde birbirleriyle anında iletişime girme becerisine sahip olmalıydı.

Bu parçacıklar arasındaki ilişki kuantum dolaşıklığıdır. Bu, kuantum dünyasında sık sık karşımıza çıkacak bir fenomendir. Einstein'ın gözünde bu tahmin, kuantum kuramcılarının görüşlerine aykırı bir şeydi, ancak Schrödinger dolaşıklık terimini icat ederek her şeyi altüst etti: "[Dolaşıklığı] kuantum mekaniğinin özelliklerinden *biri* olarak değil, klasik düşünce yapısından tamamen ayrılmaya zorlayan *karakteristik* özelliği olarak tanımlarım. Etkileşim ile iki temsilci [kuantum halleri] dolaşık hale gelir."

EPR başlangıçta kuantum tutuculuğuna karşı ilginç bir meydan okumadan fazla bir şey olarak görülmemişti, ancak 1960'larda John Bell gerçek dolaşıklık ve gizli değişkenlerin işi arasında ayrım yapabilecek dolaylı bir mekanizma öne

sürdü ve 1980'lerde Fransız fizikçi Alain Aspect gibi deneyciler Einstein'ın yanılmış olduğunu gösterdiler. Dolaşıklık gerçekten vardı. Ve ancak 21. yüzyılda olası hale gelmeye başlayan yeni nesil kuantum cihazlarında faydalı bir araç olduğu ortaya çıkacaktı.

Anında iletişim

Dolaşıklığın heyecan verici bir tarafı vardır. Bunu duyar duymaz kullanışlı bir şekilde nasıl uygulanabileceğini hemen görebilirsiniz. Bir parçacıkta değişiklik yaptığınızda bu değişiklik, bir diğerine aralarındaki uzaklık ne olursa olsun derhal yansır. Burada ulaştığınız şey, anında iletişimdir. İletişim gecikmelerinden kaynaklanan sorunlarla zaten boğuşmaktayız. Uydu hatları üzerinden yapılan telefon konuşmaları söylediklerinizin karşı tarafa erişmesi zaman aldığı için sinir bozucu olabilir. Ve uzun mesafeli uzay yolculuğuna geçtiğimizde işler daha da kötü bir hal alacaktır. Bir radyo sinyalinin Dünya'dan Mars'a ulaşması 20 dakika, en yakın yıldız komşumuz olan Proxima Centauri'ye ulaşması ise en az dört yıl sürecektir.

Kabul edilmelidir ki söz konusu yavaşlık ya da gecikme bu yönüyle uzun bir süre daha bizim için bir mesele haline gelmeyecektir, ama Dünya üzerindeki iletişimde küçük yerel gecikmeler dahi elektronik sistemler ve sesli iletişim için zorluk çıkartabilir. Ve teknik açıdan konuşursak anında iletişim sağlamanın zamanda geriye doğru bir mesaj göndermeyi olası hale getireceği hakkında ilgi çekici bir öneri de mevcuttur. Bir mesaj gecikme olmadan gönderilebilir ve zamanın daha yavaş aktığı bir yerde bir alıcı bulundurabilirse (özel göreliliğe göre alıcının çok yüksek hızda hareket etmesi gerekir) geçmişe mesaj göndermek mümkün olabilir.

Fakat anında iletişimin mümkün olduğu fark edilir edilmez hayal kırıklığı yaşanır. Dolaşıklık A'dan B'ye bilginin anında iletilmesini sağlasa da bilgi rastgeledir ve kontrol edilemez. Mesela bir parçacık çiftinin dönme özelliğini ele alalım. Belirli bir durumda, parçacık çiftinin aşağıya veya yukarıya bakma şansı yüzde 50'ye yüzde 50'dir. A parçacığının ölçümünü yapalım: A aşağı doğru bakıyor olsun olsun. A parçacığını ölçtüğümüz anda B parçacığı döner. Ancak ölçüm yapıldığında çakışan değerler üzerinde bir kontrolümüz yoktur. B'nin yukarı baktığı gerçeği bize, uzak mesafede A'nın aşağı baktığını söyler, ancak iletmek istediğimiz bir mesaj değil, sadece doğal, rastgele bir vaka tanımladığından kullanışlı bir bilgi taşımaz.

Bu kati sınırlamaya rağmen anında iletişimin çekiciliği o kadar güçlüdür ki fizikçiler (genellikle bir şeyler kanıtlama ihtiyacında olan genç fizikçiler) bunun etrafından dolaşmanın bir yolunu ararlar. Ve bazıları buna çok yaklaşmış gözükmektedir. 1980'lerde Amerikalı fizikçi Nick Herbert, sorunu Richard Feynman'ın bile bir kusur bulamamış olduğu bir tasarımla çözmüş olduğuna inanmıştı. Herbert fotonların polarizasyon adı verilen bir özelliğini (LCD ekranlar tarafından kullanılan özellik [*bkz.* sayfa 76]) kullanmaya çalışmıştı.

Polarize bir mesaj

Polarizasyon iki şekilde olur, doğrusal ve dairesel. Daha bilindik olan doğrusal biçimde farklı fotonların polarizasyonu aynı (veya en azından benzer) yönde sıralanmış olup polarizasyonun dairesel çeşidi zamanla dönüş yapar, yani fotonlar seyahat ettikçe polarizasyon yönü, hareket yönü etrafında sarmal olarak kıvrılır. Herbert'in fikri dolaşık bir foton çifti ile işe başlamak, daha sonra bunlardan "yerel" olan fotonu

polarize edici bir filtreden geçirerek doğrusal ya da dairesel şekilde polarize hale getirmekti. Polarizasyonun bu iki biçimi 0 ve 1'e karşılık gelerek sistemin, "uzaktaki" ikinci fotonun polarizasyonu, ne kadar uzakta olursa olsun yerel olanı yansıtacağından anında ikili şekilde iletişim kurmasına izin verecekti.

Bu yaklaşımın sorunu, ortada tek bir foton olduğunda "Doğrusal mı, yoksa dairesel mi polarize olmuş" sorusunu soramamamızdır. Belirli bir yönde polarize olup olmadığını kontrol etmek ve "evet" ya da "hayır" cevabını almak mümkündür, ancak gereken ayrım yapılamaz. Bu yüzden Herbert uzaktaki fotonu, yakındaki fotona polarizasyon uygulanmadan önce fotonun birden fazla kopyasını üreten bir cihaz olan lazer kazanım tüpünden göndermeyi planlamıştı. Bundan sonra uzaktaki foton demeti ikiye ayrılacak, yarısı doğrusal bir polarizasyon detektöründen geçerken diğer yarısı dairesel bir polarizasyon detektöründen geçecekti. Herbert bunun sonucu tespit etmeyi olası kılacağını düşünmekteydi.

Ne yazık ki mantığında bir kusur vardı. Lazer kazanım tüpleri fotonların mükemmel kopyalarını üretmezler. Orijinale benzeyen (mesela enerji açısından) birden fazla foton üretirler, ancak kuantum özellikleri açısından özdeş değillerdir. Hatta "klonlama yasak kuramı" olarak adlandırılan kuram, bir diğeri ile tamamen özdeş olan ikinci bir foton yaratılamayacağını kanıtlamaktadır. Bu karmaşık, ancak kapsamlı kuantum fiziği kuramı mükemmel bir kopya yapmaya en yakın şeyin, daha ayrıntılı olarak göreceğimiz kuantum ışınlanması adı verilen bir süreçte orijinali yok etmek olduğunu göstermektedir. Ancak bu şekilde birden fazla kopya "üretilemez". Lazer kazanım tüpü, araştırmanın amacına ulaşmasına yardımcı olmaz ve üretilen fotonlar yakındaki tek fotona ne olduğunu ortaya çıkarmayı mümkün kılmaz.

Kuantum sırrı

Herbert'ten beri hiç kimse iletişim için dolaşıklığı kullanan bir yol hayaline yaklaşamamıştır bile ve herhangi birinin bunu yapabilmesi pek olası değildir. Ancak anında mesaj göndermenin önüne geçen rastgeleliğin, dolaşıklığın potansiyel olarak verimli bir kullanımı (veri şifreleme) için bir artı olduğu ortaya çıkmıştır. Mesajları gizli tutmak, iletişime başladığımızdan beri karşı karşıya olduğumuz bir zorluktur. İlk günlerde saklama en yaygın uygulamaydı. Bir tabletin üzerine mesaj yazıldıktan sonra tablet balmumuyla kaplanıp bunun üzerine masum bir sahte mesaj yazılabiliyordu. Ulakların saçları kazınmış kafa derilerine yazılan ve saçlar uzayınca gizlenen mesajlar bile vardı. Bunlar yüksek hızlı modern dünyamız için hiç de ideal çözümler değildir.

Kulak misafiri olanların mesajı anlayamayacakları daha esnek bir iletişim şekline ihtiyaç olduğu Eski Romalılar döneminde bile iyice anlaşılmıştı. En belirgin yöntem, farklı bir lisan kullanmaktı. Tabii, kulak misafiri olanların bu lisanı bilmemeleri lazımdı. İkinci Dünya Savaşı gibi yakın bir tarihte Navajo dilini konuşan Amerikan yerlileri, düşman Japonların lisanı tercüme etme şanslarının düşük olduğu şeklindeki makul bir varsayımla Pasifik cephesinde ABD askeri mesajlarını iletmek için kullanılmışlardı. Eğer bunda başarısız olunursa yapay bir lisan inşa edilebilirdi. Bir şifre aslında tam olarak budur. Bir kelime (bu tamamen uydurma veya gerçek bir kelime olabilir) başka bir anlam ifade eder.

Anlam ile bağın bulunmaması sayesinde şifreler bir mesajı gizlemek için çok etkili bir yol sağlar. Ancak aynı zamanda kalıplaşmışlardır; eğer belirli bir kelime veya mesaj için bir şifreniz yoksa bunu gönderemezsiniz. Ayrıca iletişim zincirinin her iki ucunda da, kaçınılmaz bir şekilde kopyalamaya açık olan ve mesajların üçüncü bir taraf tarafından okunma-

sına olanak veren bir şifre kitabının bulunması gerekir. Bu sebeplerden ötürü, şifreli mesajların büyük kısmı harf değiştirme denilen bir yöntem ile şifrelenir ve böylece üçüncü tarafın eline geçebilecek bir şifre kitabına gerek kalmaz. Harf değiştirme yöntemi bir mesajdaki harfleri sistematik olarak değiştirmek için uygulanan bir kuraldan ibarettir.

En basit harf değiştirme yöntemi, Romalıların zamanından beri kullanılan "Sezar şifresi"dir. Bu şifreleme yönteminde, her bir harfin yerine, alfabede kendisinden belli sayıda harf sonra gelen harfler kullanılır. Mesela bu sayı 3 ise (öyle görünüyor ki Romalılar arasında çok popülerdi) A harfi Ç, B harfi D olur ve bu böyle devam eder. Bu şekilde "bombardımana başla" şeklindeki bir mesaj "dsödçtgköçpç dçüoç" ya da "dsöd çtgk öçpç dçüo ç" haline gelir; ikinci formda harfler gruplanarak mesajın içerdiği sözcük sayısı da gizlenmiş olur.

Bunun gibi basit bir yöntem, özellikle de herhangi bir lisanda bazı harflerin diğerlerinden daha sık bulunduğunu biliyorsanız nispeten kolayca kırılır. Bir frekans tablosu ile hangi değişikliklerin yapıldığını tahmin etmek ve mesajı kademeli bir şekilde çözmek mümkündür. Günümüzde artık bu tür bir şifre anahtarından başka bir şey kullanmak çok alışılmadık bir şeydir. Artık, sabit bir kayma değeri kullanılmak yerine mesajdaki her bir harf alfabe boyunca farklı miktarda kaymaktadır. Basit bir anahtar, metne tekrar tekrar "eklenen" bir kelime olabilir. Bu anahtarı üretmek için karmaşık mekanizmalar kullananlar da vardır.

Çözülemeyen mesaj

İlkesel olarak, anahtarlı şifrelerin çoğu, İkinci Dünya Savaşı esnasında Alman Enigma makineleri tarafından oluşturulanlarda olduğu gibi, anahtarı üretmek için kullanılan me-

kanizmayı çoğaltmak (çok zor olsa dahi) genellikle mümkün olduğundan, kırılabilir. Ancak 20. yüzyılın başlarından beri bilinen bir şifre türünün kırılması mümkün değildir. Buna "tek kullanımlık şifre" adı verilir. Fikir, elinizde tamamen rastgele bir anahtar (metni şifrelemek için eklenen, daha sonra da şifreyi çözmek için çıkartılan rastgele bir sayı dizisi) bulunması olarak özetlenebilir. Anahtar mesaj kadar uzundur, yani şifreleme yapıldıktan sonra, şifrelemenin nasıl yapılmış olduğunu tahmin etmeyi olanaksız kılan rastgele bir harf diziniz olur. Mesajın küçük bir bölümünü kırmayı başarsanız dahi bu, gerisini nasıl kıracağınıza dair bir ipucu vermez.

Ancak bu yaklaşımın, şifreleri güvenli bir şekilde kullanma sorununa benzeyen bir dezavantajı vardır. Bir "tek kullanımlık şifre"den faydalanabilmek için bu rastgele değerlerin mesajı hem gönderen hem de alan tarafından bilinmesi gereklidir. Bu değerler nasıl iletilirse iletilsin (ister radyo ile ister daha güvenli olması için yazılı olarak veya taşınabilir bir bellek ile fiziksel bir nesne olarak) başkalarınca ele geçirilebilirler. Rastgele değerleri ele geçirenler tüm mesajları çözüp okuyabilirler.

Kuantum fiziği, özellikle de dolaşıklık olaya burada dahil olur. Kuantum parçacıklarının davranışının kalbinde gerçek rastgelelik yattığından, kullanımdan hemen önce tek kullanımlık şifre oluşturmak kolaydır. Ancak alıcının, göndericinin şifrelediği şeyi çözebilmesi için bilginin bir uçtan diğer uca iletilmesi sorunu hâlâ mevcuttur. Kuantum dolaşıklığı bunun etrafından dolaşmanın yolunu bulmuştur.

Dolaşıklık değerleriyle ilgili ölçümlere dayandırılan anahtar, kullanılana dek *iletişimin her iki ucunda da* kelimenin tam anlamıyla mevcut değildir. Asla depolanmaz ve hiç iletilmez. Mesela, ölçüldüğü zaman ya yukarı ya da aşağı konumda olan

kuantum dönme özelliğini kullandığımızı ve 1'i "yukarı" ve 0'ı "aşağı" olarak atadığımızı varsayalım. Artık anahtar için bir ikili kaynağımız mevcuttur. Doğru dolaşıklık parçacıkları ile ölçüldüğü anda dönüşün yukarı veya aşağı yönde olma olasılığı eşittir. Yani gönderen, bir dizi parçacığın ölçümünü yapana kadar anahtar mevcut değildir, ama ölçüm yapıldığı anda alıcı, mesajı çözmek için uygun değere sahip olur.

Bu yaklaşımın potansiyel tek kusuru, üçüncü bir şahsın dolaşık parçacıkları daha anahtar kullanılmadan yakalaması, anahtarı üretmesi, kaydetmesi ve başkasına iletmesidir. Ancak müdahale dolaşıklığı bozduğu için bir parçacığın hâlâ dolaşık olup olmadığının kontrol edilmesi mümkün olduğundan bu tespit edilebilir. Eğer birkaç parçacıkta bir bu kontrol yapılırsa bağlantı, müdahale riski olmaksızın güvenli bir şekilde tutulabilir.

Işınla beni

Kuantum dolaşıklığının etkileyici başka bir kullanımı, *Uzay Yolu* dünyasının en ünlü kavramlarından birini, ışınlayıcıyı hayata geçirmektir. Bu teknolojinin, uzay gemisi *Atılgan*'dan bir gezegen yüzeyine iletilecek bir şeyin veya bir kişinin parçacıklarını taraması ve hedef yerde tekrar ürettiği varsayılmaktadır. Bu fikir televizyon dizisinde esas olarak, mekiklerin iniş kalkış sahnelerini çekmek için gerekli olan pahalı maketlere para harcamaktan kaçınmak için kullanılmış, ancak (en azından bilimkurgu camiasında) takdire şayan bir kavram haline gelmişti. Gerçeklik ise noksanlarla doludur.

Sorunlardan birine, ışınlayıcıyı keşfeden talihsiz bilimadamını Vincent Price'ın oynadığı 1958 yapımı *Sinek* adlı filmde kabaca değinilmişti. (Bu film 1986'da tekrar çekildi ve bu kez bilimadamını Jeff Goldblum canlandırdı.) Filmde ışınlama

odasına insan denek ile birlikte bir sinek giriyor ve sonuçta korkunç bir insan-sinek melezi ortaya çıkıyordu. Filmde cereyan edenlerin gerçekleşme olasılığının düşüklüğünü bir yana bırakın (odacıktaki hava molekülleri bile sorun yaratacaktır) bir insanı oluşturan atomların tamamını taradıktan sonra bunları güvenli bir şekilde ayırmak ve sonra başka bir yerde tekrar bir araya getirmek başlı başına çok zor bir iştir. Bir insanı oluşturan çok fazla sayıda (yaklaşık 7.000 trilyon çarpı trilyon) atomu akla uygun bir hızda taramak binlerce yıl sürecektir.

Klonları getirin

Işınlayıcının çalışması bir başka açıdan daha olanaksızdır. Görmüş olduğumuz üzere "klonlama yasağı", bir kuantum parçacığının bir kopyasını yapamayacağımız anlamına gelmektedir. Şüphesiz ki böyle bir ışınlayıcı, bir şeyi A'dan B'ye gerçekten taşımamaktadır: A'daki orijinalin B'de bir kopyasını yapmaktadır. Ama kuantum dolaşıklığı bunu bir sorun olmaktan çıkartır. Bir çift dolaşık parçacık kullanarak bir parçacığın kuantum halini bir diğerine aktarabiliriz. Böylelikle klonlama yasağı delinebilir çünkü bilgi hiç meydana çıkmamıştır. Bir noktadan diğerine ölçülmeden gitmiştir.

Aslında olup biten şey ışınlayıcıdaki dolaşık bir parçacığın iletilecek olan parçacıkla etkileşime girmesidir. Bu etkileşimin sonucuna bağlı olarak bilginin bir kısmı alıcıya konvansiyonel olarak gönderilebilir ve bu bilgi alıcıya, orijinali ile aynı olan nihai bir parçacık üretmesi için ikinci dolaşık parçacıkla ne yapması gerektiğini anlatacaktır. Sürecin parçası olarak orijinal parçacığın kuantum hali karıştırılmıştır ve bu parçacıklardan meydana gelen herhangi bir şey parçalarına ayrılıp dağılacaktır.

Bu, *Sinek*'teki gibi bir ışınlayıcı icat etmiş olan herhangi bir bilim insanının durup düşünmesine yol açacaktır. Ellerinde olan şey aslında bir madde ışınlayıcı değil, orijinali yok ederken uzak bir konumda tam olarak eksiksiz bir kopyasını üreten bir madde kopyalayıcıdır. Eğer bu şekilde bir ışınlayıcıdan geçerseniz, herkesin bilmesi gereken şey, diğer uçtaki kişinin de siz olacağınızdır. Sizin anılarınıza, düşüncelerinize sahip olacak, fiziksel her ayrıntı açısından mükemmel olacaktır. Ancak ışınlayıcıya adım atmış olan "siz" yok olacaktır.

Uygulamada bir kişiyi eksiksiz olarak taramanın ve diğer uçta tekrar yaratmanın neredeyse imkânsız olması sebebiyle (kuantum fizikçileri asla "asla" dememeyi öğrenmişlerdir), kuantum ışınlama süreci bireysel kuantum parçacıkları ile sınırlıdır. Bunun, kuantum bilgisini, ne olduğunu ortaya çıkarmadan (bir ölçüm almak parçacığı geri dönülmez bir şekilde değiştireceğinden hayatidir) bir yerden başka bir yere nakletme yeteneğine ihtiyaç duyan özel bir cihaz türü için bir lütuf olduğu ortaya çıkmıştır. Bunlar, normal bir bilgisayarın bir ömür boyunca ulaşabileceğinden çok daha fazlasını yapabilmek için süperpozisyon ve dolaşıklık gibi kuantum tuhaflıklarından faydalanırlar.

Kuantum çağının bir sonraki dev adımı, kuantum bilgisayarının geliştirilmesi olacaktır.

BÖLÜM 11

BİT'TEN KUBİT'E

Bilgisayarlar gündelik yaşamımızın merkezine yerleşmiştir. Eğitimimizi bilgisayarlar üzerinden sağlarız, işlerimizi onlarla yürütürüz, onlarla eğleniriz ve iletişim kurmakta akıllı telefonlarımızı kullanırız. "Bilgisayar" Victoria çağında da mevcuttu ancak onu kullanarak hesap yapan insanlarla karşılaştırıldığında solda sıfır kalıyordu. Bu terimin farklı bir anlam kazanma olasılığı ilk kez Charles Babbage'ın çalışmasıyla ortaya çıktı. 1821'de, o zamanlarda 30 yaşında olan Babbage, astronomi tabloları üzerinde yorucu bir çalışma yürütüyordu.

Buhar ile işlem yapmak

Babbage para kazanmak için böyle zihin yorucu işlere ihtiyacı olmayan zengin biriydi. Tablolar üzerinde arkadaşı John Herschel'e (Uranüs'ü keşfeden ünlü astronom William Herschel'in oğlu) iyilik yapmak için çalışıyordu. Babbage bu yorucu işi yapmaya hiç hevesli değildi ve "Tanrım, Herschel! Keşke bu hesaplamalar buhar gücüyle yapılabilseydi," demişti. Doğru olsun veya olmasın, efsaneye göre Babbage, kısa süre sonra bu sözünden ilham alarak, tekrarlanan bu yorucu

hesaplamaları çaba harcamadan ve hata yapmadan gerçekleştirmek için mekanik bir hesap makinesi tasarlamaya girişti. Sonuç olağanüstü bir bilgisayar olacaktı.

Fark Motoru, birtakım değerlerin önce bir dizi çevirme hareketi ile girildiği ve daha sonra sonuçların çıkartılması için kolun tekrar tekrar çevrildiği çarklı bir mekanizma idi. Babbage, kafası daha büyük şeylerle meşgul olduğundan Motor'unun sadece küçük bir kısmını inşa etmişti (ancak çalışan eksiksiz bir versiyon, Londra Bilim Müzesi tarafından inşa edilmiştir). Bir insan hesaplayıcı ile karşılaştırıldığında Fark Motoru'nun sorunu sadece basit aritmetik işlemler yapabiliyor olmasıydı. Çarkları ancak bu tür işlemlerin yapılabilmesine olanak tanıyordu. İnsan hesaplayıcılar, beyinleri sayesinde çok daha esneklerdi. Babbage, mekanizmaya yerleştirdiği, değiştirilmesi mümkün olmayan sabit talimatlardan kurtulmak istiyordu. Fark Motoru üzerinde çalışmayı bıraktı. Bu, hükümetin hoşuna gitmedi çünkü kendisine bu iş için 17.000 sterlin ödenmişti (bu, cari değer veya emek-değer kuramı dikkate alındığında bugünün parasıyla 1,2 milyon veya 13 milyon sterlin eder). Babbage'ın siyasi koruyucuları bu para karşılığında bir şeyler almayı bekliyordu, ancak o, sadece kısmen tamamlanmış bir makine teslim etmişti.

Babbage'ı çok kullanışlı olabilecek bir makineden uzaklaştıran kavram, üzerine deliklerden oluşan motifler basılmış kartlar aracılığıyla mekanik bilgisayarında bir dizi esnek talimat kullanma fikriydi. Buna benzer kartlar, ipek dokuma endüstrisinde devrim yapan kumaşa bağlı bir dizi kart üzerindeki delikler ile motif belirleyen Fransız Jacquard tezgâhında zaten kullanılmaktaydı. Babbage, tezgâhı kontrol eden mekanizmanın bir hesaplama (ya da bilgisayar) motorunu da kontrol ederek hem veriler hem de veriler ile ne yapılacağını

gösteren talimatlar içerebileceğini düşünüyordu. Bu makine prensipte herhangi bir işlemi gerçekleştirebilirdi.

Babbage'ın gerçek bir mekanik bilgisayarı betimleyen büyük vizyonu Analitik Motor hiç inşa edilmedi. Zamanının mühendislik sınırlamaları ile karşılaştırıldığında inşası muhtemelen olanaksızdı. Ancak Babbage, makinenin hafıza ve verileri işlemek için farklı parçaları olması gibi gereklilikleri fark etmişti. Hayatında hiç bilgisayar görmemiş olmasına rağmen genellikle ilk bilgisayar programcısı olarak tanımlanan kadının çalışmalarına daha fazla dikkat etseydi en azından kâğıt üzerinde daha da ileri gidebilirdi.

Bahsi geçen kadın, romantik şair Byron'un kızı, Babbage'ı gençliğinden beri tanımış olan ve eğer annesi kızının soylu bir evlilik yapmasında ısrarcı olmasaydı Babbage ile evlenmiş bile olabilecek Augusta Ada King idi. Ada King (tanınmak istediği ismiyle Ada Lovelace) İtalyan bilim insanı Luigi Menabrea tarafından Analitik Motor üzerine Fransızca yazılmış olan bir makaleyi tercüme etmişti. Sadece belge üzerinde çalışmakla kalmamış, Motor'un nasıl kullanılabileceği üzerine uzun notlar eklemişti. Genellikle iddia edildiği üzere bilgisayar programları yazmış olduğunu söylemek abartı olur, ancak bunun nasıl yapılması gerektiği hakkında kesinlikle fikir yürütmüştür ve Babbage yardım tekliflerini kabaca geri çevirmemiş olsaydı, programları muhtemelen yazabilirdi de. Ancak ne Analitik Motor ne de onu programlama fırsatı asla gün yüzüne çıkmadı.

Bilgisayarın gerçek babası

Babbage muhtemelen Winston Churchill yüzünden bilgisayarın babası olarak adlandırılır fakat bu doğru değildir. Churchill'in paranoyası sayesinde Batı dünyasının Alan Tu-

ring adlı genç bir adama ne kadar çok şey borçlu olduğunu nispeten yeni keşfettik. Turing'in bilgisayarın babası olduğu kesin olduğundan Babbage olsa olsa bilgisayarın büyükbabası olabilir. Babbage'ın gelişecek olan bilgisayar endüstrisi ile gerçek bir teknik bağlantısı olmayan çalışması, bilgisayarın evriminde çıkmaz bir sokaktı, ancak Turing bilgisayarın gideceği yolu çizmişti. Turing'in İkinci Dünya Savaşı esnasında Bletchley Park'ta yürüttüğü şifre kırma alanındaki çalışmalarının gizlenmesinde (Birleşik Krallığın savaş sonrası düşmanlarının, Britanya'nın şifre kırma konusunda ne kadar ilerlemiş olduğunu fark etmemesini sağlamak kaygısıyla) Churchill'in ısrarı etmesi sayesinde Turing'e ne kadar çok şey borçlu olduğumuzu gösteren tüm parçaları bir araya getirmek çok uzun sürmüştür.

Alan Turing efsanevi bir kişilik haline gelmiştir. Dahi bir şife kırıcı olduğunu kanıtlamıştır ve bilgisayarın doğası hakkındaki analizi, tüm modern dijital bilgisayarların temelini, her zaman takdir edilmeyen bir şekilde atmıştır. Efsane haline gelmesinin sebeplerinden biri şudur: O tarihlerde Birleşik Krallık'ta eşcinsellik suç teşkil ediyordu ve kendisi de eşcinsel olduğu gerekçesiyle hüküm giydi. Bir süre sonra siyanür zehirlenmesinden öldü. Kamuoyuna onun bu duruma dayanamayıp intihar ettiği kanısı egemen oldu.

Turing'in işlemiş olduğu "suç" sebebiyle kendisine hapis cezası ya da buna alternatif olarak "kimyasal olarak hadım edilme" (dişi hormon enjeksiyonu) gibi merhametsiz ve gereksiz bir ceza verilmiş olduğu kesinlikle doğrudur. (Turing Birleşik Krallık hükümeti tarafından 2013'te affedilmiştir.) Bu tedavinin Turing'i alt üst ettiği ve sonunda siyanür enjekte edilmiş bir elma yiyerek intihara sürüklediği öne sürülmüştür. Aslında kanıtlar Turing'in tedavi sonrasında tamamen iyileştiğini ve öldüğünde hayatından memnun olduğunu

göstermektedir. O günlerde yatak odasının yanındaki laboratuvarında, onu öldürecek olan siyanür buharını ürettiği düşünülen bir kimyasal deney yürütüyordu. Tüm belirtiler intihardan ziyade talihsiz bir kazaya işaret etmektedir. Ancak nasıl ölmüş olursa olsun, bize bırakmış olduğu mirasın şüphe duyulacak bir tarafı yoktur.

Nihai sınır

Turing Bletchley'deki çalışması ile bilgisayarların gücünü göstermiş ve hipotetik bir "evrensel bilgisayar" geliştirerek nasıl çalıştığını anlatmıştı. Ancak bilgisayarların sınırlarını fark eden ilk kişi de kendisi olmuştu. Bilgisayar üreticilerinin her yıl daha güçlü ve daha hızlı bilgisayarlar üretmesine alışkınız. Bir işlemcinin işlem yapma gücündeki artış yıllardan beri, 1965'te İntel'in kurucularından biri olan Gordon Moore'un tanımlamış olduğu, bir çipin üzerindeki transistörlerin sayısının (bir bilgisayarın gücünün kabaca bir ölçümü) her yıl iki katına çıktığı "Moore Yasası" ile açıklanmaktadır. Bu yasa daha sonra her iki yılda bir iki katı olarak güncellenmiştir. Moore'un tahmini günümüzde gerçekliğe çok yakındır. Ancak kontrol edilemeyen bu büyüme sonsuza kadar süremez.

Bir noktada, bir çipin üzerindeki devreleri giderek daha da minyatürleştirmenin bireysel kuantum parçacıkları ile uğraşmak anlamına geleceği ve buradan daha ileri gidilemeyeceği fiziksel sınırlara ulaşacağız. Dahası bu seviyede tünelleme gibi kuantum etkileri, çipin çalışmasında ciddi sorunlara yol açabilir. Daha da önemlisi, Alan Turing donanım ne olursa olsun (mesela evrensel bilgisayar tasarımında) yazılımın kapasitesi için temel bir sınır olduğunu göstermiştir. Turing bir bilgisayar ile asla çözülemeyecek bazı sorular olduğunu

ve bazı soruların cevaplanabilmesi için evrenin ömründen daha uzun zaman gerektireceğini göstermişti. Mesela girdi olarak verilecek herhangi bir diğer programın durup durmayacağı veya sonsuza kadar devam edip etmeyeceğine karar verecek bir program yazmanın imkânsız olduğu ortaya çıkmıştır. Böyle sorunlara bilindik bir örnek, bir yol şebekesinde A'dan B'ye giden en iyi rotayı hesaplamanın çok uzun sürecek olmasıdır. Bir uydu navigasyon bilgisayarı bunu yaparken kesin bir sonuca ulaşamaz ve yaklaşık değerler kullanmak zorundadır.

Turing'in hayali evrensel bilgisayarı sıfır ve birlerin yazılabileceği, okunabileceği veya silinebileceği bir kâğıt şeritten oluşmaktaydı, ancak konvansiyonel bir elektronik bilgisayarı, her biri 0 ve 1 olarak temsil edilen olası iki konumdan birinde olan bir dizi anahtar şeklinde düşünmek daha kolaydır. Turing'in kavramsal versiyonundan dizüstü bilgisayarlarımıza ve akıllı telefonlarımıza kadar tüm bilgisayarlar, kendileri de birler ve sıfırlar olarak depolanmış olan bir dizi talimatın kontrolü altında zamanlarını bu anahtarları 1 ve 0'lar arasında değiştirerek geçirirler. Bir bilgisayar çipinde devrenin küçük parçalarının her biri, bir çift elektronik cihaza eşdeğerdir: bir kapasitör ve bir transistör. Kapasitörün kendisi, biti temsil eden bir elektrik yükü ile bir hafızadır ve transistör, kapasitörün okunması veya değiştirilmesi haline karar veren bir anahtar gibi iş görür.

Kuantumlar imdada koşar

Tüm elektronik cihazların bir kuantum cihazı olduğunu görmüş olmamıza rağmen Turing'in öngörmüş olduğu sınırlamalar, işleri bir sonraki seviyeye taşıyan gerçek bir kuantum bilgisayarı biçiminde yeni bir zorlukla karşı karşıya

kalırlar. Bir kuantum bilgisayarı, bitlerden her birinde bir elektrik yükünü meydana getiren elektronlar olarak depolanan 0 veya 1 değerlerinden birini kullanmak yerine, değeri saklamak için kubit olarak bilinen tek bir kuantum parçacığının durumundan faydalanır. Bu bir kuantum parçacığı olduğundan durumların süperpozisyonunda bulunabilir. Mesela bilgi depolamak için bir parçacığın dönme özelliğini kullanabilirsiniz. Bu, 0 veya 1 olabilen bir bit yerine ölçüldüğü anda her iki değerden birine sahip olma olasılığı bulunan çakışmış bir hal olabileceğinden, bilgisayarın kapasitesini genişletiriz.

En basit şekliyle bu, bilgisayara ekstra bitler eklemek şeklinde görülebilir. Bir bayt olarak bilinen sekiz bit, iki bitlik numaralardan toplamda dört tane depolayabilir (0 ile 3 arasındaki rakamları), ancak sekiz kubit 28 tane iki bitlik numara yani 256 tane numara saklayabilir. Dahası bir kubit, bir açıdan bakıldığında sonsuz sayıda basamaklı bir sayıyı depolayabilir. Bunun sebebi, süperpozisyonların olasılığının yüzde 50 olmasının gerekmemesidir. Yukarıda ve aşağıda olma olasılıklarının, bir okun yönünün yukarı (%100 yukarı) ve aşağı (%100 aşağı) doğru olmasına karşılık geldiğini düşünürseniz, doğru olasılık ilişkisi ile bu okun baktığı yön, 0 ile 1 arasındaki herhangi bir sayıyı belirtmek için kullanılabilir. Aslında bir kubit, kademeli olarak artmaktan ziyade düzenli olarak değişen bir değeri kaydettiğinden dijital olmaktan ziyade analogdur. Bilgisayarın kapasitesini büyük ölçüde artırır. En azından teoride artırır.

Teoride geçerlidir çünkü kubitlerle uğraşmak kolay değildir. Süperpozisyonlar çökme eğilimindedir ve bir kuantum parçacığını ölçmek onun durumunu değiştirdiğinden bu değerleri kullanmak zordur. Ancak doğru bir şekilde kullanmayı başarabilirseniz bir kuantum bilgisayarı, konvansiyonel bir

bilgisayarın gerçekleştirmek için tüm evrenin ömrü kadar zamana ihtiyaç duyacağı işlemleri yürütmeyi vaat etmektedir. Ve az sonra da görecek olduğumuz üzere, aksi halde olanaksız olan işleri yürütecek programlar, en azından kavramsal olarak zaten yazılmışlardır.

Geleneksel bir bitin değerini bir kubiti okuyarak kontrol ederseniz, kuantum bilgisayarları ile çalışmanın neden bu kadar maharet gerektirdiğini anlayabilirsiniz. Sahip olduğu yüke bağlı olan geleneksel bir bit 0 veya 1 olacaktır. Ve yükünü değiştirmediğiniz sürece sonsuza kadar böyle kalacaktır. Basit ve dolambaçsız. Ama bir kubitin, bir kuantum parçacığının dönmesiyle depolanmış olduğunu gözünüzde canlandırın. Hatırlarsanız bu, ölçülene kadar gerçek bir değeri olmayan, sadece olasılıkların koleksiyonu olan parçacığın bir özelliğidir. Kuantum bilgisayarı, kubitin yukarı doğru dönme olasılığı yüzde 40 ve aşağı doğru dönme olasılığı yüzde 60 olduğundan değer 0,4'müş gibi hareket edebilir. Ancak bilgisayarın dışında olan bizler dönüşü ölçersek ya yukarı (mesela 0) ya da aşağı (1) değerine ulaşırız. Yüz denemede kırk defa 0 ve altmış defa 1 değerini alırız. Ancak tek bir ölçüm yaparak bunu bilemeyiz. Kubitin kendisi analog olabilir ancak ölçümü dijital bir şekilde yapılır ki bu son derece sinir bozucu olabilir.

Piyasaya sürülmemiş algoritmalar

Bir kuantum bilgisayarını nasıl programlayacağımız hakkında düşünenler ile, Babbage'ın var olmayan Analitik Motor'unu nasıl kullanacağı üzerinde kafa patlatan Ada King arasında çarpıcı bir paralellik vardır. King'in, Motor'un kullanacağı işlem türlerini göz önüne alabiliyor olmasına benzer şekilde bazı bilim insanları, bir kuantum programının nasıl çalışacağı

üzerinde düşünmüşlerdir. Bir kuantum bilgisayarının 2001 yılında 15'in çarpanlarını doğru bir şekilde 5 ve 3 olarak hesaplamasıyla çığır açmasından daha fazlasını yapacak kadar büyük ve stabil kuantum bilgisayarlarına henüz sahip olmasak da, çalışan bir bilgisayara girildiğinde, aksi halde çözülemez olan sorunlarla başa çıkmamıza olanak verecek algoritmalar (temel olarak programların mantıksal betimlemeleri) zaten mevcuttur.

15'in çarpanlarını bulmak için kullanılan yaklaşım, AT&T adlı şirkette Peter Shor tarafından üretilmiş olan son derece güçlü bir kuantum işlem algoritmasına dayanmaktadır. Kökleri 1994'e dayanan, daha büyük bir sayıya ulaşmak için çarpılan sayılar olan çarpanları bulmak için kullanılan bir kuantum bilgisayarıdır. En iyi konvansiyonel bilgisayarların bulmak için binlerce yıla ihtiyaç duyacağı sayılarla çalışabilir. Tuhaf olan şey, bunun potansiyel olarak çok kullanışlı ve oldukça basit bir bilgisayar algoritması olmasına rağmen bilgisayar alanındaki bilim insanlarının çoğunun hiçbir zaman olası hale gelmemesini umduğu bir şeydir.

İnternetteki hareketlerimizi güvenli kılmak için kullanılan şifrenin sağlamlığı bu çarpanları hesaplamanın zor oluşuna dayandığından uzmanlar endişelidir. İnternet tarayıcınızda küçük bir asma kilit sembolünü gördüğünüz her sitede (genellikle kredi kartı bilgilerinizi girerken) RSA adındaki bir şifreleme mekanizması kullanılmaktadır. Buna açık anahtar/özel anahtar sistemi adı verilir. İki anahtar (veriyi gizlemek için kullanılan değerler) bulunan bir veri şifreleme sistemidir. Bunlardan biri olan açık anahtar, mesajı şifrelemek için kullanılır. Bu anahtar herhangi birine verilebilir. Ancak özel anahtar olmadan mesajın şifresini çözmek mümkün değildir. Ve bu anahtar da, mesela, sadece bankada bulunur. Bunun

anlamı bankaya gönderecekleri mesajı herkesin şifreleyebileceği, ancak sonucu sadece bankanın okuyabileceğidir.

Bu mekanizma 1977'de MIT'deki üç bilgisayar uzmanı tarafından geliştirilmişti (Ronald Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman; bu yüzden RSA olarak adlandırılır). Onlar bu alanda çalışan ilk kişiler değildi. Bu yaklaşım ilk olarak 1974'te Britanyalı bilim insanı Clifford Cocks tarafından geliştirilmişti, ancak Cocks Birleşik Krallık hükümetinin istihbarat iletişim merkezi GCHQ'da çalışmaktaydı ve keşfi, RSA piyasaya sürülene kadar gizli tutulmuştu. (Churchill'in hayaletinin gölgesi buraya da düşmüştür.) Özel anahtar, açık anahtarın kısımlarını oluşturan daha da büyük bir sayıyı üretmek için çarpılan çok büyük iki asal sayıya dayanmaktaydı. Bu iki asal sayıyı bilmeden mesajın şifresini çözmek mümkün değildi. Bu kadar büyük bir sayının asal çarpanlarını bulmak, konvansiyonel bir bilgisayar kullanılarak o kadar uzun sürmekteydi ki mekanizma güvenli olmaya devam eti. Ancak Shor'un algoritması bu sorunu ortadan kaldırdı ve ortalama denebilecek bir kuantum bilgisayarının çarpanları üretmesini mümkün hale getirdi. Bilgisayar camiası işte bu nedenle endişelidir.

Samanlıkta kuantum iğnesi aramak

Güvenli internet sitelerini kırmak elbette Shor'un algoritmasının tek kullanım alanı değildir (pek çok bilgisayar sorununu çözmek için kullanılabilir) ancak bu sinir bozucu beceri ciddi bir endişe kaynağıdır. Kuantum bilgisayarlarını programlamanın başka bir etkili yolu, Grover'ın arama algoritmasında zaten belirlenmiştir. Bu da, 1996 yılından beri bilinmektedir. Lov Grover'ın fark etmiş olduğu şey, bir indis olmadan bir veri tabanında eleme yapmak söz konusu olduğunda bir kuantum

bilgisayarının, konvansiyonel bir bilgisayar karşısında dev bir avantaja sahip olmasıdır. Bu öyle büyük bir avantajdır ki Grover'ın vakur dergi *Physics Review Letters*'da bu konu üzerine yayınlamış olduğu makale "Kuantum Mekaniği Samanlıkta İğne Aramaya Yardımcı Olur" başlığını taşımaktaydı.

Bilgisayarlar bilgiyi bulmakta çok hızlı olsa da bunu akıllıca tekniklerle başarırlar. Bunların en basiti bir dizindir. Örneğin bir şirketin müşterilerinden oluşan bir veri tabanını göz önüne alırsanız, isim veya müşteri numarası gibi bilgiye hızlı bir şekilde ulaşmayı mümkün kılmak için dizinleri kullanacaklardır. Ancak ehliyetlerinin numaralarından oluşan bir dizine sahip olmayabilirler (veri tabanınızın bunu içerdiğini varsayarsak). Eğer veri tabanında bir milyon kişi mevcutsa, doğru girdiyi bulmak için 999.999 tanesini taramanız gerekebilir. Tabii bu da çok şanssız olduğunuz anlamına gelir. Şans faktörünü bir kenara bırakırsak, bir kaydı bulmak için ortalama yarım milyon kayda bakmanız normaldir. Bir kuantum bilgisayarında ise Grover arama algoritması sadece 1.000 arama ile doğru kişiyi bulmayı garanti etmektedir çünkü kuantum algoritması, girdilerin numaralarının karekökleri ile çalışmaktadır.

Google ve diğer arama motorları, göz açıp kapayana kadar devasa miktarda veri arayabilecek gibi gözüktüğünden böyle bir algortimaya ihtiyaç duyulmadığı düşünülebilir ancak arama motorları bunu, giderek artmakta olan büyük miktarda enerji ve depolama alanı gerektiren bir süreç olan dizinler inşa ederek yapmaktadırlar. Bu kadar büyük miktarda bilgi ile gerçek bir kuantum arama motoru, arama endüstrisinin çehresini değiştirebilir. Dahası, Grover algoritması olasılıklar üzerinde çalıştığı için her bir kaleme tek tek bakmaktansa bulanık, belirsiz kriterler ile daha insansı aramalar yapabilir.

Grover birinin telefon numarasını bulma örneğini verir. Söz gelimi önceki gün tanışmış olduğunuz birinin telefonunu bulmak istiyorsunuz. Adının John olduğunu ve yaygın bir soyadı taşıdığını hatırlıyorsunuz, ancak soyadının ne olduğunu tam olarak hatırlamıyorsunuz. Soyadının Smith olma olasılığı yüzde 50, Jones olma olasılığı yüzde 30 ve Miller olma olasılığı yüzde 20 olsun. Ayrıca evinden Londra Kulesi'ni görebildiğini söylediğini ve telefon numarasının son üç hanesinin doktorunuzun numarasının son haneleri ile aynı olduğunu hatırlıyorsunuz. Sadece bunlar gibi bulanık bilgilerin yardımıyla gerçek dünyanın gereksinimlerini karşılamaya çalışırken Grover'ın yeni algoritmasını kullanan bir kuantum bilgisayarı, doğru sonuca konvansiyonel bir aramadan çok daha hızlı ulaşacaktır.

Önce bir bilgisayar yakalayın

Kuantum bilgisayarları üzerinde çalışan bilim insanları bu iki uygulama (hızlı arama ve büyük sayıları çarpanlarına ayırma) sahasında büyük umutlar beslemektedir, ancak henüz üzerinde düşünülmemiş olan başka pek çok uygulama sahası da olabilir. Lov Grover'a göre: "Bunu herkes kabul etmeyecektir, ancak keşfedilmeyi bekleyen daha pek çok kuantum algoritması olduğuna inanıyorum." Şu ana kadar bu algoritmaların gelişimi, bunları kullanacak olan bilgisayarlarınkinden çok daha ilerdedir. Ancak daha sonra da görecek olduğumuz üzere, bir kuantum cihazı olarak adlandırılıp satışa sürülmüş olan bir bilgisayar, bu kuantum bilgisayar algoritmalarını tam olarak kullanamamaktadır.

Dünya çapında kuantum bilgisayarları üzerinde çalışan düzinelerce ekip vardır ve bunlardan bazıları, bir avuç kubiti kısa süreli olarak çalıştırmayı başarmıştır, ancak bunlar, ge-

nellikle kriyojenik soğutma içeren deneysel üniversite ekipmanıdır; elektronik eşya mağazasından satın alabileceğiniz bir şey değildir. Tasarımları toleransın sınırlarını zorlamış olduğundan Babbage'ın, hesaplama motorlarının geliştirilmesini engelleyen temel mühendislik ilkelerini aşmakta zorlanmış olması gibi, mevcut kuantum bilgisayarları kuantum mekaniğinin katı tabiatına bir çözüm bulmak zorunda olup her zaman süperpozisyonun çökmesi ve dolaşıklığın kaybolması riski altındadır.

Motorun içinde

Kuantum bilgisayar mühendislerinin karşılaştığı zorlukları anlamak için bilgisayarların aslında nasıl çalıştığına biraz daha yakından bakmamız gereklidir. Sevimli bir grafik arayüz ile etkileşime girmeye çok alışkınız, ancak bunun arkasında sıfır ve birlerden oluşan serileri manipüle eden işlemci arı gibi çalışmaktadır. Yazı yazmaktan tutun oyun oynamaya dek tüm programların çalışması için sadece üç işlem yapılması gerekir: Bir bitteki değer okunabilir, kopyalanabilir veya değiştirilebilir. Bu değişiklikler, başka bir bitin değerine bağlı olarak bir biti değiştirip değiştirmemeye karar veren kapı olarak adlandırılan cihazlar tarafından yürütülür.

Kapılar, bir kuralın fiziksel temsili olan basit cihazlardır. İlkesel olarak bir kuralı somutlaştırmalarının çeşitli yolları vardır. Kullanmakta olduğumuz bilgisayarlarda genel olarak bunlar elektroniktir, kontrolü transistörler aracılığıyla sağlarlar ancak mekanik de olabilirler (küçükken bir dizi fiziksel kapı ile çalışan bir bilgisayar modelim vardı) ya da Turing'in kâğıt şeridi üzerinde bir dizi etken ile de temsil edilebilirler. Transistörün gelişimine bakarken elektronik kapılara zaten göz atmıştık (*bkz.* sayfa 70).

Kuantum bilgisayarlarında da kapılar vardır, ancak geleneksel bilgisayarlara göre çok daha karmaşık olma eğilimindedirler. Bu kısmen kuantum dünyasındaki "klon yok teoremi"nden kaynaklanmaktadır. İyi haber ise kuantum dolaşıklığının kısmi bir geçici çözüm sağlamasıdır. Kuantum ışınlanma süreci (*bkz.* sayfa 215) eğer orijinal parçacığın hali süreç esnasında kaybedilmişse bir kuantum parçacığının eksiksiz bir kopyasını yaratmanın mümkün *olduğu* anlamına gelmektedir.

Dolaşıklık, orijinal parçacığın ne olduğunu keşfetmeden özelliklerini yeni parçacığa naklederek kopyalamayı mümkün kılar. Ancak bu durumda dahi kuantum kapıları, konvansiyonel olanlara kıyasla çok daha alengirlidir. Yani mesela, kuantum dünyasında bir NOT kapısına en yakın olan şey, bir X kapısıdır. Daha önce görmüş olduğumuz NOT kapısı basit olarak 0'ı 1'e ve 1'i de 0'a çevirir. X kapısı, 0 değerine sahip olma olasılığı A ve 1 değerine sahip olma olasılığı B olan bir kubit alır ve 0 değerine sahip olma olasılığı B ve 1 değerine sahip olma olasılığı A olan bir kubit üretir. Kapıdan geçerken olasılıklar ters yüz olur.

Kuantum hokkabazlığı

Kuantum bilgisayarlarını ve altlarında yatan kapıları kullanmak için gereken mantığın büyük kısmı son yüzyılda belirlenmiştir. Zor olan kısım, bilgisayarı çalıştırabilmektir. Sorun yazılımda değil donanımdadır, özellikle de kuantum parçacıklarını kullanmaktadır. Mesela, kubit olarak fotonları kullanmak istiyorsunuz. Fotonları üretmek kolaydır. Bakkaldan aldığınız bir ampulü yaktığınızda saniyede yaklaşık 100 milyar kere milyar foton pompalarsınız. Bu, fazlasıyla yeterlidir.

Ancak tek bir parçacıkla çalışmak istiyorsanız size kolaylık sağlamaz.

Kuantum parçacıklarından oluşan eksiksiz bir seriyle bilgisayım yapmak imkânsız değildir. Aslında bu, Shor algoritmasının ilk gerçek gösterimidir. 2001 yılında IBM'in Almaden Araştırma Merkezi'nde Isaac Chuang ve ekibi tarafından yürütülmüş olan bu deney, fotonlar yerine molekülleri kullanmıştı. Tek bir molekül ile uğraşmak yerine ısmarlama yaptırmış oldukları, her biri 7 kubitlik bir cihaz olarak iş gören yedi atomlu florür/karbon molekülünden bir milyar kere milyar adet kullanmışlardı. Atomların nükleer dönüşlerini etkilemek için radyo frekansındaki atımları ve sonucu tespit etmek için de, MRI tarayıcısına benzeyen bir NMR (nükleer manyetik rezonans) kullanmışlardı.

Zekice olan şey bunların, atomların yanlarındaki diğer atomları etkileyeceği şekilde inşa edilmiş olan özel olarak tasarlanmış moleküller olmasıdır. Yani mesela bir atom, ancak yanındaki atom da aynı durumda ise belirli bir yönde bir dönüş yapabilir; bu da kapı olarak iş görmelerini sağlar. Büyük miktarda atom sahibi olmak hem sonuçları NMR cihazı ile tespit etmenin mümkün olması, hem de kaçınılmaz olan hataların çok fazla sayıdaki doğru değerin arasında boğulması anlamına gelmektedir. Bu deneysel bilgisayar, görmüş olduğumuz gibi 15'in çarpanlarının 3 ve 5 olduğu sonucunu çıkarmayı başarmıştır. Bu çok ilgi çekici değilse de Shor'un algoritmasının pratik bir uygulamasıdır.

Ancak bir molekül içerisindeki atomları kubitler olarak kullanan ve bir molekül bulutunun içerisinde ortalama alan bu çeşit bir yaklaşım sadece az sayıda kubit ile işe yarar, yani ciddi bir şekilde işe yarayan bir kuantum bilgisayarının bireysel kuantum parçacıklarına geri dönmesi olasıdır. Bu alan-

da sürmekte olan çalışmalar bu varsayıma dayanmaktadır. Fotonları tek tek üretecek mekanizmalar mevcutken atomlar (ya da en azından elektron kazanmış ve kaybetmiş olan yüklü versiyonları) 1980'lerden beri tek tek manipüle edilmektedir.

Parçacıkları sabitlemek

Fotonların kubitler olarak kayda değer avantajları mevcuttur, çünkü üretilmeleri kolay olup stabildirler ve bu da bir kuantum bilgisayarını kurmak için gerekli olan kapıların demet bölücülerin bir bileşimi kadar basit olabileceği anlamına gelir (*bkz.* sayfa 117). Hesaplamanın sonunda sonuçları okumak da kolay olmalıdır, foton tespit teknolojisi çok gelişmiştir. Ancak kubitler olarak fotonları kullanmanın dezavantajı, birbirleriyle kolayca etkileşime girmemeleri ve sabit durmamalarıdır, ancak aynalı bir konteyner kullanılarak küçük bir alanda alıkonabilir veya Bose-Einstein kondensatları gibi materyallerle yavaşlatılabilirler.

Atomlar, daha doğrusu elektrik yüklü versiyonları olan iyonlar, yerlerini koruyan ve birbirleriyle kolayca etkileşime giren, takip edilmesi daha kolay kubitlerdir, ancak kapı mekanizmaları, fotonlar için olandan daha karmaşıktır. İyon tuzakları, kuantum bilgisayarları ile yapılan deneylerde kullanılan en yaygın yaklaşımlardandır. Diğerleri ise SQUID'ler ile programlama olasılığını araştırmaktadır (*bkz.* sayfa 195). Yine de, belki en belirgin olan yaklaşım, tek bir elektronu tutabilen katı haldeki tuzaklar olan kuantum noktalarıdır. Bu yaklaşım, deneysel kuantum bilgisayar donanımlarının çoğundan daha az karışıktır (bunlar bilakis ticari bilgisayar ortamına benzer) ancak diğer tüm kuantum bilgisayarları gibi nokta temelli bir cihaz da eşfazlılığın kaybolması sorunuyla karşı karşıya kalır.

Dünyadan izole olmuş

Bir kuantum bilgisayarının çalışması için kubitlerin dünyadan izole edilmiş olması, sadece kapılar ve diğer kubitlerle etkileşimde olması gereklidir. Pratikte bir kuantum parçacığını tamamen izole etmek neredeyse imkânsızdır; kısa süre içerisinde etrafındaki madde ile etkileşime girer, eşfazlılığı kaybeder ve bunun sonucunda süperpozisyon halini yitirir ve bilgisayara artık bir faydası kalmaz. Bu sorun, dolaşık parçacıklarda daha da önemli hale gelir. Dünyanın dolaşıklık başkenti olan Viyana Üniversitesi'nden Xiasong Ma'nın dediği gibi, "Dolaşıklığın hazırlanması, sürdürülmesi ve manipüle edilmesi zordur."

Eşfazlılığın bozulmasından önce zamanı uzatmak (ilk kuantum bilgisayarlarında bu, saniyenin milyonda biriyle ölçülmekteydi) eğer cihaz gerçek dünyada bir görevde kullanılacaklarsa hayatidir. Kuantum bilgisayarları hızlı olabilir, ancak hesaplanması birkaç milisaniyeden uzun süren ağır işlerde kullanılmaları beklenmektedir. Eşfazlılığın bozulması ile başa çıkmak için muhtemel yaklaşımlardan biri, her bir kubitin, ışınlama ile özellikleri farklı bir kuantum parçacığına geçmeden önce sadece çok kısa bir süre kullanıldığı "çetin ceviz" yöntemidir. Ancak bilgisayarın ölçeği ne kadar büyürse, eşfazlılık sorunu da o kadar büyük olur.

Ancak bu kubitleri taze tutmakta giderek daha başarılı oluyormuşuz gibi gözüküyor. 2013 yılında Kanada'da Simon Fraser Üniversitesi'nde çalışmakta olan bir ekip, bir dizi kubiti mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda yaklaşık üç saat veya oda sıcaklığında 35 dakika süperpozisyon halinde tutmayı başarmıştı (fakat sürecin yine de kriyojenik seviyelere soğutulmuş olan kubitlerle başlatılması gerekmişti). Bu, daha önce ulaşılabilmiş olandan yaklaşık 100 kat daha uzun bir süreydi. Kubitler, son derece saf silikondan yapılmış bir çipte tutulan fos-

for iyonlarının dönüşünden elde edilmişti. Ancak, bu gelişme hakkında heyecana kapılmadan evvel, tamamı modifiye edilmemiş aynı dönüş halinde bulunan yaklaşık 10 milyar iyon içerdiğini göz önüne almak gerekir ki bu, süreci gerçek bir kuantum bilgisayarı için kullanışsız hale getirir. Bu adımdan, farklı hallerdeki iyonlara ulaşmak ve eşfazlılık kaybolmadan etkileşime girebilmek hiç de önemsiz bir adım değildir.

Uzun bir yol

Los Alamos'daki US National Laboratory'de, günümüze kadar harcanan çabaları "hâlâ kuantum bilgisayarının vakum tüpü çağında olduğumuz" şeklinde tanımlayan Richard Hughes'un fikirleri hakkında bir şeyler söylemek gerekir. Daha önce de görmüş olduğumuz gibi, geleneksel bilgisayarlar önceleri bu tüpler veya valfler kullanılarak inşa edilmekteydiler. 18.000 valfli ENIAC'ı büyütmek onun bugün kullanmakta olduğumuz milyonlarca transistor içeren çiplerle aynı kapasiteye gelmesini sağlamayacaktı. Sorun daha iyi bir valf inşa ederek değil, aynı işi çok farklı bir yolla yapacak tamamen yeni bir teknoloji geliştirerek çözülmüştü. Benzer şekilde stabil, kontrol edilebilir miktarda kubite ulaşarak kuantum bilgisayarının ölçeğini büyütmekte kullanılabilecek yeni bir teknoloji ortaya çıkabilir.

Kuantum bilgisayarlarını pratik dünyaya uygulamak için gerekli olan adımlardan birisi, 2013 yılında atılmıştı. Kubitlerin etkileşim kurmasına olanak veren ve kuantum bilgisayarlarının bu kadar güçlü olmasına olanak veren dolaşıklık süreci, idare edilmesi güç olan kuantum parçacıkları kullanan karmaşık deney düzeneklerinden alınarak katı haldeki bir çipe geçirilmişti. Queensland Üniversitesi'nden bir ekip bir çip üzerindeki iki konumu dolaştıran ilk ekip olmuştu.

Deneyde atomlar, elektronlar veya fotonlar yerine kubit vazifesi görebilecek yapay atomlar olarak 0,2 mm'lik alüminyum yapılar (kuantum ölçeğinde devasadırlar), bunları bağlayan süperiletken bir mikrodalga dalga kılavuzu ve görünür ışık için mikrodalgalar üzerinde fiber optik gibi iş gören metal bir tüp kullanılmıştı.

Uyumsuzluğun ahengi

Çoğu araştırmacı, sorunların giderilmesinin sadece bir zaman meselesi olduğuna inanmaktadır, ancak eşfazlılığın kaybolmasından kaçınmak ve kubitleri dolaşık halde tutmak o kadar büyük sorunlar yaratır ki bunu öneren az sayıdaki kişi bile bu şekilde işe yarar bir kuantum bilgisayarı yaratamayacaktır. Ancak umut, tuhaf bir yerden gelmiştir. Mükemmel olmaktan uzak kubitlerden bir grubun dağınıklığından faydalanmak ve bu alanda uyumsuzluk olarak bilinen bir şeyi kullanarak hesaplama yapmak mümkün olabilir gibi gözükmektedir. Olasılıklar ilk olarak 2001 yılında, Shor'un kuantum algoritmasını kullanarak 15'in çarpanlarını keşfeden görünürde başarılı kuantum bilgisayarının aslında kusurlu olduğunun keşfedilmesiyle ortaya çıkmıştı. Kuantum bilgisayarı oda sıcaklığında çalışmaktaydı ve bilgisayarın yedi kubiti arasındaki dolaşıklık, bir sonuç elde edilemeden çok önce çökmüş olmalıydı. Ancak bilgisayar yine de işe yaramıştı.

Geleneksel bir kuantum bilgisayarında bir kuantum kapısı girdi olarak iki veya daha çok sayıda el değmemiş, dolaşık kubit alır ve sonuç bundan sonra okunur. Ancak ölçülmeleri için çevresi ile etkileşime girmesi dikkatli bir şekilde engellenmiş geleneksel, iyi ayarlanmış bir kubit ve daha "normal" dağınık halindeki diğer bir kubiti kapıdan geçirmenin de bir bilgisayım ile sonuçlanacağı keşfedilmişti. Kubitler dolaşık

hale getirilememişti ancak kuantum hesaplamasına izin verecek kadar bir etkileşim olmuş gözüküyordu. "Uyumsuzluk" bir sistemin gözlem tarafından ne kadar etkilendiğinin bir ölçütüdür. Geleneksel bir klasik sistemin uyumsuzluğu sıfırdır, ancak süperpozisyon veya dolaşıklık halindeki kuantum sistemlerinin tümü pozitif bir uyumsuzluk değerine sahiptir ve bu uyumsuzluk bir dereceye kadar korelasyon, çökmeye çok da yatkın olmayan, saf kubitler ile dağınık olanların karışımını bağlayan bir çeşit sözde dolaşıklık üretiyor gibi gözükmektedir.

Uyumsuz bir bilgisayarın çıktısı, geleneksel bilgisayarların kesinliğine alışmış olanlar için biraz sinir bozucudur. Sonuçlar, olaya dahil olan bu dağınıklık yüzünden kesin olmayıp bir dizi döngünün ortalaması olmak zorundadır. Ancak eğer bu yapılırsa, sonuçlar güvenilir gibi gözükmektedir. Uyumsuz bir bilgisayar yine de bir kuantum cihazıdır. Eşfazlılığın kaybolmasından korunmuş olan en az bir saf kubite ihtiyacı vardır ve normal, klasik hallerde bulunan kalan kubitler ile uyumsuzluk, bir kuantum etkisi haline gelir. Eğer bu tek, saf kubitin dağınık olmasına izin verilirse tüm süreç çöker ve işe yaramaz hale gelir. Ancak aksi halde, kalan kubitlerin dağınıklığının yarattığı parazit ve düzensizlik, çevreden dikkatli bir şekilde korunmuş olan bir kuantum bilgisayarından daha iyi ve stabil bir bilgisayar oluşturuyor gibidir. Bu, ticari bir model inşa etmek isteyen ve eşfazlılığın kaybolması sorunuyla boğuşanlar için kesinlikle faydalı bir düşüncedir.

Bu yaklaşımın kullanışlılığı, bu haliyle sınırlıdır, çünkü uyumsuzluk bağlantıları olan çok basit düzenekleri kullanabilecek matematik bilgisine sahibiz. Şu anda deneysel fizikçiler, kuramsalcıların kendilerine yetişmesini beklemektedirler. Ancak bu yaklaşım umut vaat etmektedir ve uyumsuzluk üzerinde ciddi olarak çalışılmaktadır. 2012 yılın-

da Singapur'da, 70'in üzerinde araştırmacının katılımı ile ilk uyumsuzluk konferansı gerçekleştirilmiştir. Kuantum bilgisayarlarına melez yaklaşım kesinlikle hızla ilerlemektedir. Bu da, D-Dalgasını tanıtmak için muhtemelen iyi bir zamandır.

Bu dalga başka dalga

2007 yılında D-Wave Systems adlı Kanada firması bir kuantum bilgisayarı yaptığını duyurdu. Ama bunun bir kuantum bilgisayarı olduğunu herkes kabul etmedi. Bu durum şaşırtıcı görünebilir. Bir bilgisayar, kuantum etkilerini ya kullanıyordur ya da kullanmıyordur. Aslında D-Wave bilgisayarının bir kuantum bilgisayarı olduğuna şüphe yoktu ancak kesin olmayan şey şuydu: D-Wave Systems'in kendi bilgisayarını yapmak için izlediği yol, kuantum bilgisayarı yapmak için herkesin izlediği alışılmış yoldan farklıydı ve bu yeni yolun, bilgisayarın ölçeğinin bu kadar çok çaba harcamaya değecek kadar büyütülebilmesini sağlayıp sağlamayacağı belli değildi. D-Wave "adiyabatik bir kuantum bilgisayarı"dır. Bunun anlamı, görmüş olduğumuz kuantum mantık kapılarının yerine, kuantum tavlama adı verilen bir süreci kullanmak için ayarlanmış olan bir dizi kubit konmuş olmasıdır.

Kuantum tavlama, kubitlerin en düşük enerji seviyelerine ulaşmaya çalışacakları anlamına gelir ve hesaplamanın, cevabın gerektirdiği en düşük enerji seviyesini içerecek şekilde ayarlanmasını gerektirir. Bu işlem, bir arazi parçası üzerindeki en alçak noktayı aramaya biraz benzemektedir: Önce alçak noktaların toplandığı yeri bulur, sonra da bu alan içerisindeki en alçak noktaya odaklanırsınız. Kuantum tünellemesi, düşük enerji hallerini arayıp bulmayı engelleyen enerji zirveleri arasında, ihtiyaç duyulan minimum enerji keşfedilene dek rastgele bir yürüyüş yapmaya izin verir. Minimum değeri bu

şekilde bulan tüm algoritmalarda, mutlak minimum olmayan bir noktaya varma tehlikesi mevcuttur ki bu, adiyabatik kuantum bilgisayarları için algoritmalar yazanların dikkat etmesi gereken bir konudur, ancak ilkesel olarak bir çözüm bulmak için bir mekanizma sağlamaktadır.

Böyle bir bilgisayarın deneysel bir versiyonu 2006 yılında, sadece dört kubit kullanarak 143'ü çarpanlarına ayırmak suretiyle "15'i çarpanlarına ayırma" numarasını ezip geçerek hızlı bir zafer kazanmıştı. Bu versiyon, hızlı Shor algoritmasını değil, sistemi sayının çarpanlarını doğal olarak üretmesi için cesaretlendiren özel bir "adiyabatik" algoritma kullanıyordu. Ve Shor'un çarpanları bulmak için tutulabilecek tüm konvansiyonel yollardan çok daha hızlı olduğu belli olsa da, adiyabatik algoritmanın Shor kadar hızlı olup olmadığı henüz gösterilmemişti. Bir D-Wave bilgisayarının bazı problemleri "dijital bilgisayarlarda çalışan yazılım paketlerinden 3600 kat daha hızlı" çözebileceği iddia edilmişti. Bu iddia doğrudur, ancak 10 milyon dolarlık bir D-Wave bilgisayarında çalışması için özel olarak ayarlanmış bir algoritmayı, sıradan bir PC'de çalışan ticari bir algoritma ile kıyaslamaktadır. Bu, avantajlı olduğuna dair kesin bir kanıt değildir.

D-Wave'in Google tarafından satın alınan ve NASA'nın Ames Araştırma Merkezi'ne kurulan 503 kubitlik en yeni versiyonu, test edilen ilk makineden kesinlikle çok daha gelişmiştir. Bu makine ticari bir bilgisayara daha çok benzemektedir (elbette bir dizüstü bilgisayar değil, bir süperbilgisayardır) ancak adiyabatik sürecin, gerçek anlamda kuantum bilgisayarlarının yararlarını sağlayıp sağlayamayacağı konusunda hâlâ benzer şüpheler mevcuttur. Günümüze kadar D-Wave yaklaşımının en başarılı sonucu, görüntüleri tanımak için bir algoritma üretmek olmuştur. Google gibi bir arama motoru için bunun değerli olduğu açıktır, ancak D-Wave'in bunu

kendisine eşdeğer konvansiyonel bir makineden daha hızlı yaptığına dair hâlâ iyi bir kanıt yoktur. Jüri henüz kararını vermemiştir, ancak bir şey kesindir: D-Wave çok amaçlı bir kuantum bilgisayarı değil, sadece belirli, sınırlı algoritmaları çalıştırabilen, çok özelleşmiş bir cihazdır.

Konuşmak güzeldir

Kuantum bilgisayarlarını çalıştırabilmek ayrı, internetin bir kuantum versiyonuna ulaşmak ise ayrı bir şeydir. Birbirinden uzakta iki nokta arasında dolaşıklığı kurabilmek, bu iki konum arasında dolaşıklığa dayalı kuantum şifrelemesini kullanmayı kolaylaştıracağından (*bkz.* sayfa 213) zaten önemlidir. Bundan ötürü, Dünya'daki bir istasyon ile bir uydu arasındaki bir bağın eşdeğeri olan bir dolaşıklık bağına ulaşmak için, Viyana'da bir binadan diğerine dolaşık fotonları ışınlamak için kayda değer miktarda çaba sarf edilmiştir. (Bu göründüğü kadar kolay değildir: ofis bloklarından birinin sahipleri, ısıyı yansıtan özel pencerelerin dolaşıklık sinyalini tamamen mahvettiği fark edildikten sonra camlarını geçici olarak sökme nezaketinde bulunmuştur.) Uluslararası Uzay İstasyonu'nda yapılan bir deneyden sonra, Dünya üzerinde birbirinden oldukça uzaktaki iki konum arasında dolaşık parçacıkları ışınlayacak olan (dolaşık kuantum anahtarlarının bu şekilde dağıtımı için hayati olan) ilk deneysel uydu, Japonlar tarafından 2014'te fırlatılmıştır.

Dolaşık parçacıkların, şifreleme ya da kuantum bilgisayarlarının kubit seviyesinde birbirlerine bağlanmaları ve hesaplamaları paylaşmaları için optik kablolar yoluyla benzer şekilde dağıtımını sağlama sorunu da mevcuttur. Bunu gerçekleştirmenin bir yolunu bulmaya dönük çok parlak bir fikir, Hollanda'da Delft Teknoloji Üniversitesi'nde 2013 yılında

yapılan bir çalışmada yayınlanmıştır. Daha önce düşünülmemiş olan kavram, elmasları kullanmaktır.

Deneyde dolaşık kubitler birbirlerine 3 metre mesafede olan iki elmas içinde tutulmuştur, ancak bunun amacı, daha büyük ölçekte bir ayırma işlemine kalkışılmadan önce fikrin kanıtlanmasıdır. Hapsedilmiş iyonlar gibi daha konvansiyonel kubitlerde uzak mesafeli dolaşıklığın zaten göstermiş olduğu gibi, elmas içerisinde çok sayıda kubiti bağlamanın, elmas kristalinin yapısının özellikle değerli bir davranışı olmasından ötürü, büyük ölçekli sistemlerden çok daha kolay olduğu düşünülmektedir.

Hollanda'daki elmaslardaki kubitler, kristaldeki katışıklılıklara dayanmaktadır. Saf elmas, karbon atomlarının mükemmel bir örgüsüdür, ancak örgüdeki boşluklarla azot atomlarının katışıklılıkları birleştirilerek, boşlukta tutulan elektronların döngü hallerine dayanan bir kubit oluşturulabilir. Ancak bu, yine de verimsiz bir süreç olup 10 milyon denemede sadece bir dolaşıklık üretir, ancak bu sürecin kayda değer şekilde daha verimli yapılabileceği umulmaktadır. Elmasın iyon tuzaklarına karşı sahip olduğu büyük avantaj ise, kubitlerin oda sıcaklığında göreceli olarak stabil olmasıdır. Buna karşın iyon tuzakları etkili şekilde soğutulmalıdır. Dolaşık elmaslarda yüksek sıcaklıklarda çalışılabilir çünkü kristal örgü kubitleri eşfazlılığı bozabilecek potansiyel etkilerden korumaktadır. Dahası, kaçınılmaz olarak bozunan kubitlerin elmas içerisindeki boşluklardan geçebileceği ve bir kubit için tipik olan mikrosaniyeler yerine saniyeler boyunca stabil kalabileceği gösterilmiştir bile. Elmasın boyutlarını artırmak, diğer kubit teknolojilerinin çoğundan daha kolaydır. Konuşmak için henüz erken, ama elmasa dikkat etmeye yarar var, bir gün kuantum bilgisayarları üzerinde çalışanların en iyi dostu olabilir.

Hayati olmasa da şu anda kuantum bilgisayarlarının çoğu, kubitleri göreceli olarak stabil tutmak için kriyojenik ortamların kullanımına dayanmaktadır. Ancak son derece soğuk olmak, sadece elektrik ve manyetik etkilerle ilgili bir gereklilik değildir. Sıvıların da özelliklerini dönüştürebilir.

BÖLÜM 12

BU CANLI!

Bir masa üzerinde sıvıdan bir çember olduğunu hayal edin. Döndürmeye başlatmak için hızla çevirin. Dönmeye başlar. Döner, döner... Sonsuza kadar gider. Bir süperiletkende akımların sonsuz bir şekilde akacağı gibi bir süperakışkan da viskozite veya sürtünmeyle karşılaşmaz. İçsel bir yapışkanlığı yoktur; hareketini durduracak bir şey yoktur. Bir kabı süperakışkan sıvı helyum ile doldurursanız bu tuhaf sıvı kendi kendine kabın duvarlarını tırmanmaya başlar, kenarlardan taşar ve damlamaya başlar.

Özel bir sıvı

Heike Kamerlingh Onnes'in süperiletkenliği ilk gözlemleyen kişi olması, son derece düşük sıcaklıklarda yaptığı çalışmalarının, aynı zamanda onun süperakışkanlığı iş başında gözlemleyen ilk kişi olduğu anlamına gelmesidir. Fakat yukarıda bahsedilen tuhaf davranışları keşfetmemiştir. Helyum kritik sıcaklığa doğru soğutulurken reaksiyon kabındaki minik gözlem delikleri, Onnes'in sıvının kaynadığını görmesini sağlamıştı. Aslında soğuma süreci, helyum buharını sıvının üzerinden hemen uzaklaştırıp hareketi en hızlı olan atomları

alıp geriye daha yavaş, daha soğuk olanları bıraktığından, bu kaynamadan faydalanmaktaydı.

Sıcaklık 2,17 K'nin altına düştükçe sıvının görünüşü de değişmişti. Fokurdama aniden durmuş, geriye sakin, hareketsiz bir yüzey kalmıştı. Meydana gelen şey (Onnes fark etmemiş olsa da) sıvı helyumun bir kısmının, viskozitesi ve termal direnci olmayan bir süperakışkan haline gelmiş olmasıydı. Kaynayan bir sıvı tam olarak tekdüze olmadığından ötürü içinde baloncuklar oluşur. Daha fazla sıvının buhara dönüşerek bir baloncuk oluşturduğu kızgın noktalar vardır. Ancak süperakışkan o kadar iyi bir iletkendir ki biriken ısıyı tek bir baloncuk oluşamadan dağıtır ve geriye sakin, bozulmamış bir yüzey bırakır.

Onnes bunu fark etmiş ancak üzerinde durmamıştı, ne olup bittiğinin tam olarak anlaşılması için de 1930'larda Rusya'dan Pyotr Kapitsa ve John Allen ile Don Misener'in Cambridge'de süperakışkanlığı tam olarak keşfetmesini beklemek gerekti. Kapitsa 1934'te Fizik Sorunları Enstitüsü'nü kurmak için (cihazlarının bir kısmı ile) Rusya'ya dönmeden önce Cambridge'de Mond Laboratory'de, düşük sıcaklıklar üzerinde, büyük miktarda sıvı helyum üretmek için yeni bir mekanizma geliştireceği çalışmasına başlamıştı. 1937'de, Mond'da kalan ikili ile işbirliği yaparak süperakışkanlığı keşfedecekti.

Kaçış uzmanı bozonlar

Süperakışkanlar kaçış konusunda birer sanatçıdırlar. Bulduklarını en küçük aralıkta, viskoziteleri olmadığından moleküllerin doğal hareketi, zamanla yollarını bulacakları anlamına gelmektedir. Aslında sıvı olmalarına rağmen, gaz gibi davranırlar. Daha da önemlisi, bir bardak gibi açık bir

kapta tutulan bir süperakışkan, yüzey üzerinde, kenarda ve bardağın dışında ince bir film tabakası oluşturacak, zamanla da kütleçekimine karşı koyarak bardağı boşaltacaktır. Bu etkiye, süperiletkenliğe çok benzer bir fenomen sebep olur. Bir süperiletkende elektronlar çiftler oluşturur ve tüm materyal boyunca üst üste gelen dalga fonksiyonları üretir. Bir süperakışkanda daha büyük olan bozonlar, bir Bose-Einstein kondensatı olarak bilinen bir madde tipi oluşturmak için birbirine bağlı bir dalga fonksiyonuna girerler.

Basın tarafından sıklıkla yanlış kullanıldığından (özellikle de başka bir bozon olan Higgs bozonundan bahsedilirken) bu "bozon" kelimesini açıklamak için geçici olarak konunun dışına çıkmamız faydalı olacaktır. Bozon, ismini Hintli fizikçi Satyendra Bose'dan alan bir parçacıktır. Kuantum parçacıklarının tümü ya bozon ya da davranışlarını tanımlayan matematik türüne atıfta bulunan fermionlardır. Bozonlar Bose-Einstein istatistiğini izlerken fermionlar Fermi-Dirac istatistiğine göre davranırlar. İki parçacık türü, farklı dönüş değerlerine sahiptir. Fermionlarınki buçuklu sayılar, bozonlarınkiyse tam sayılardan oluşur. Davranışlar söz konusu olduğunda, bozonlar birbirleriyle tamamen aynı halde olan büyük gruplar oluşturmaktan mutlu olurken bir sistem içerisinde birleşik bir dalga fonksiyonu ile aynı halde iki fermion bulunamaz. Bu, Pauli dışlama ilkesi olarak bilinir ve kuantum mekaniğinin en temel ilkelerinden biridir.

Temel parçacıklar için "madde" parçacıkları fermionlar ve güç taşıyan parçacıklar (fotonlar gibi) bozonlar olma eğilimindedirler. Ancak atomlar gibi birleşik parçacıklar, dönüş değerlerinin birbirlerine nasıl eklendiğine bağlı olarak her ikisi de olabilir. Süperiletkenlik ve süperakışkanlık, bozon olarak davranan parçacıklara bağlıdır, bu yüzden bir süperi-

letkendeki elektronlar çift oluşturmalıdırlar, böylece buçuklu dönüşleri birleşerek tam sayıda bir dönüş yapar: Elektron çifti, bir bozon olur. Bu kavramın önemini, helyumun iki formunda görebiliriz.

"Standart" helyumun (helyum-4) çekirdeğinde iki proton ve iki nötron vardır. Bu çift sayı yüzünden bir bozondur, yani görece kolay bir şekilde bir süperakışkan olduğu özel bir hale geçebilir. Ancak sadece bir nötronu olan helyum izotopu (helyum-3) bir fermiondur ve tek sayıda parçacığı vardır. Helyum-3 atomları, sadece çok düşük sıcaklıklarda bir bozon oluşturmak üzere birleşerek bir süperakışkan olur.

Bir tuhaflıktan ötesi

Süperakışkanlar uzun süre etkileyici laboratuvar şovları yapmak için kullanılan bir tuhaflık olmaktan öte geçmediler, ancak yakın zamanlarda kütleçekimindeki çok hassas varyasyonları ölçmek için özel yapım jiroskoplarda ve başka maddeleri kendi rızasıyla topak haline getiren (ki bu, spektroskopide çok kullanışlı bir fenomendir) bir "kuantum çözücü" olarak kullanılmaktadırlar. Spektroskopi bir materyalin bileşimini keşfetmek için madde ile ışık arasındaki etkileşimi kullanır ve genellikle bir gaz üzerinde uygulanır. Kuantum çözücünün tuhaf fiziksel doğası, çözünmüş parçacıkların gazmış gibi davranacağı anlamına gelir, bu şekilde gaz haline getirilmesi zor olan materyaller üzerinde spektroskopik analiz yürütülebilir.

Bir süperakışkanın bir gaz gibi davranması, bir çeşit süper buzdolabı sağlamak için kullanılabilir. Buzdolapları şöyle çalışır: Bir sıvı dar bir gedikten geçirilir ve bu sırada doğal olarak soğumaya sebep olur çünkü hızla buharlaşır, buharlaşırken de enerji kaybeder ve sıcaklığı düşer. Süperakışkanlar

bu süreçte özellikle etkilidirler, örneğin titreşimi engellemek için sistemlerini son derece düşük sıcaklıklarda tutan buzdolabı benzeri bir sistem içerisinde çok soğutulmuş helyum kullanan, 1983'te uzaya fırlatılan *Kızılötesi Astronomi Uydusu*'nda kullanılmışlardır.

Ancak süperakışkanların çok özel uygulamalarından birisi, diğerlerinin önüne geçmiştir çünkü bu, anlaşılması en zor olan doğal fenomeni yakalayabilen bir maddedir. Bazı süperakışkanlar, ışığı kapana kıstırabilir.

Yavaş cam

Özel bir pencere hayal edin. Bu öyle bir pencere olsun ki ışığın onun içinden geçmesi bir yıl alsın. Pencereyi güzel bir manzaranın önüne koyun ve bir yıl bekleyin. Bu pencereyi daha sonra evin herhangi bir yerine koyduğunuzda aynı manzarayı on iki ay boyunca koruyabilirsiniz. Manzarayı bir televizyon ekranından değil, on iki ay boyunca camın arkasından ışık geliyormuş gibi izlersiniz. Bu, bilimkurgudur (Bob Shaw, bu "yavaş cam" kavramına dayanan *Other Times, Other Eyes* adlı mükemmel bir kitap yazmıştır) ama yine de özel bir tür süperakışkanın realitesine, ışık hızını etkilemek için bir Bose-Einstein kondensatının kullanılmasına tuhaf biçimde çok benzer.

Işık hızından evrensel bir sabit olarak bahsedilmesine alışkınız. Bize, hiçbir şeyin ışıktan hızlı seyahat edemeyeceği öğretildi. Bu doğrudur ama aynı zamanda doğrulanmamış bir betimlemedir. Aslında söylememiz gereken şey, hiçbir şeyin ışığın boşluktaki hızından daha hızlı hareket edemeyeceğidir. Işığın boşluktaki hızı saniyede 299.792.458 metredir (kesin ve eksiksiz olarak, çünkü bir metre, ışığın bir saniyede aldığı mesafenin 299.792.458'da biri olarak tanımlanır) ve gerçekten

de evrensel bir sınırdır. (Tabii, kuantum dolaşıklığının yol açtığı tuhaflığı bir kenara bırakırsak.) Ancak ışık hava veya cam gibi bir ortamdan geçerken yavaşlar. Bunun sebebi en kolay fotonların ayrı ayrı kuantum seviyelerinde görülür.

Saydam bir maddenin ışığı hiç etkilemeden içinden geçirdiğini düşünme eğilimindeyiz, ancak aslında bu fotonlar karşı konulmaz bir şekilde elektronlar ile etkileşime girer, elektronların enerjisini artırır ve yok olur. Kısa süre sonra elektron tekrar bir foton yayar ve KED'in materyal içindeki sürekli dansı devam eder. Ancak bu süreç fotonları kaçınılmaz bir şekilde yavaşlatır. Işık, mesela cam içinde boşluktaki hızının yaklaşık üçte ikisi hızında hareket eder. Bu yavaşlama, rastlantı sonucu nükleer reaktörlerin bazı türlerinin etrafını saran sıvıdan yayılan tuhaf mavi parıltıya yol açar. Reaktör, elektronları ışığın su içindeki hızından daha hızlı bir şekilde fırlatmaktadır ve sonuç, Cerenkov radyasyonu adı verilen bir çeşit optik patlamadır.

Yani ilkesel olarak bir parça cam ile bu özel pencereyi inşa edebiliriz. Tek sorun, ışığın boşluktaki hızının üçte ikisinin bile hâlâ çok hızlı olmasıdır. Bir yıllık ışığı tutacak olan bir camın 5.000.000.000.000 kilometre kalınlığında olması gerekir. Ancak bir tam akışkan bundan çok daha iyisini yapabilir. 1990'ların sonunda, Harvard Üniversitesi Rowland Bilim Enstitüsü'nde çalışan Danimarkalı bir bilim kadını olan Lene Verstergaad Hau, bir Bose-Einstein kondensatı kullanarak ışığı yürüyüş hızına kadar yavaşlatmıştı.

Kondensatın içerisinde

Harvard'da yapılan deneyde sodyum atomları, bir Bose-Einstein kondensatı oluşturana kadar soğutulmuşlardı. Kondensatlar genellikle mat olurlar, ancak Hau'nun ekibi, materyal

içerisinden bir yol açabilmek için bir lazer kullanmıştı. Bu lazer, birinciyi takip edecek olan ikinci bir lazer demetindeki fotonların kondensatın parçacıkları ile dolaşık hale gelmesini sağlayarak kondensatı modifiye etmiş ve bu, fotonların materyal içerisinden çok düşük bir hızla geçmesine sebep olmuştu. İlk sonuçlar ışığın hızını saniyede 17 metreye kadar düşürmüştü, ancak çalışmanın ilerlemesi ile bu hız, saniyede bir metrenin altına kadar gerilemişti. Ancak süperakışkanın işi bununla bitmemişti.

2001 yılında Hau'nun ekibi, yolu açan ilk demetin yoğunluğunu düşürmenin çift lazer olarak adlandırılan etkisi üzerinde çalışmaktaydı. Eğer demetin gücü kademeli olarak sıfıra indirilirse, ikinci demetin başına takdire şayan bir şey gelir. Hiç ortaya çıkmaz. Karanlık bir boşluğa düşen ışık gibi basitçe emilmez de. Çünkü bileşik lazer yeniden çalıştırıldığında ikinci demet, kondensattan dışarı çıkar. Materyal ışığı içinde hapsetmeyi başararak madde ve ışığın "karanlık faz" olarak bilinen bir karışımını üretir.

Karanlık faz daha sonra, kuantum bilgisayarlarının geleceği için çok değerli olabilecek bir şekilde geliştirilebilir. Hau'nun ekibi 2006 yılında foton bazlı bir kubitin bir kondensat içinde emilmesini, daha sonra gerektiği zamanda da kubitin değişmeden salınmasını başarmıştır. Kubit, kondensatın içerisinde, daha sonra optik kubiti tekrar yaratacak olan bir dalgaya dönüşmüş gibi gözükmektedir. Kondensatın tek bir dalga fonksiyonu olduğundan sodium atomları tutarlı bir şekilde davranır ve kuantum bilgisini kaybetmez. Deneyde kubit, çok yakın bir mesafedeki (160 mikrometre) ikinci bir kondensata aktarılmış ve madde içerisinde fiziksel bir dalga formunda birinciden tamamen ayrı olan bu ikinci kondensattan geri alınmıştır.

Fotonların bir karışımı

Bu kesinlikle takdire şayandır, ancak tam olarak yavaş cam değildir. Sorun, farklı yönlerde hareket etmekte olan ışığın camdan geçip gitmesinin farklı süreler isteyeceğidir. Bu aslında her zaman olan bir şeydir, ancak bu etki genellikle o kadar küçüktür ki ihmal edilebilir. Ancak elinizde, ışığın içinden geçip gitmesinin bir yıl alacağı bir santimetre kalınlığında bir cam parçası bulunduğunu hayal edin. Işık eğer diyagonal bir yol izlerse camdan geçmesi 1,4 yıl alabilir. Yani pencerenin diğer tarafından görülen, hiçbir anlam ifade etmeyen bir foton karmaşası olabilir. Gerçekten yavaş cam yapmak için gerekli olan şey, yavaş geçiş süresi ile görüntünün tamamının dış yüzeye tek bir birim olarak geçmesine olanak verecek olan bir çeşit holografik tekniğin bir bileşimi olacaktır.

Ancak eğer bir görüntü değil de sadece ışığın geçmesini istiyorsanız bu sınırlama bir sorun olmaz. Mesela, bir yolun birkaç metre üzerine, yaklaşık on iki saatlik bir "zaman derinliği" olan bir yavaş cam astığınızı hayal edin. Gün içerisinde ışık camdan yavaş yavaş geçecektir. Karanlık bastığında ise ışık dökülmeye başlayacak, altındaki her şeyi yapay olmayan, sadece oraya ulaşması biraz gecikmiş olan gerçek gün ışığı ile aydınlatacaktır. Bir pencerenin öteki yanına bakmak yerine sadece yayılan ışığı kullanmak istediğiniz için de görüntünün karışmış olması önemli olmayacaktır. Çalışması için elektriğe bile ihtiyacı olmayan mükemmel bir yapay ışık olacaktır.

Bu teknoloji, uygulamada hâlâ bilimkurgu seviyesindedir. Hau'nun Bose-Einstein kondensatı mutlak sıfıra yaklaşan masraflı (herhangi bir sokak lambasından çok daha masraflı) bir soğutma işlemi gerektirmektedir ve sadece lazer ışığı ile iş görebilmektedir. Ancak yavaş cam ilkesi bize şunu göster-

miştir ki, eğer bu madde olur da oda sıcaklığında üretilebilirse heyecan verici fırsatlar yaratacaktır.

Gücü hissedin

2013 yılında bir Bose-Einstein kondensatı ile ışık arasındaki etkileşim, bilimkurgu sahnesine tekrar yerleşti, ancak bu sefer ışın kılıcına benzetilen şaşırtıcı, yeni bir fiziksel davranış olarak. Basın bayram ediyordu: "*Yıldız Savaşları*'nın ışın kılıcı sonunda icat edildi." "Bilim insanları sonunda gerçek bir ışın kılıcı icat etti." "MIT ve Harvard bilim insanları kazayla gerçek ışın kılıcını icat ettiler." Adil olmak gerekirse keşfin arkasındaki bilim insanlarından biri olan Harvard'lı Profesör Mikhail Lukin, "Bunu ışın kılıçları ile karşılaştırmak yanlış bir benzetme olmaz" diyerek yangına körükle gitti. Harvard bu reklamı kesinlikle çok beğendi ama hakikat manşetlerdeki çılgınlıktan çok uzaktı.

Eğer basın kuantum fiziğine siz okuyucuların artık olduğu kadar aşina olsaydı, keşfedilen şeyin süperiletkenliği mümkün hale getiren bağlı elektronlar olan Cooper çiftinin (*bkz.* sayfa 178) optik eşdeğeri olduğunu söylemeleri daha iyi bir benzetme olurdu, çünkü Lukin ve MIT profesörü Vladan Vuletic, birbirlerine bağlı olan foton çiftlerini, ışık "molekülleri"ni üretmişlerdi. Halkla İlişkiler açısından iyi sonuç doğurmayacağını bilsem de, ufukta bir ışın kılıcı gözükmediğini söylemek zorundayım.

Fotonları eşlemek önemli bir iştir, ama bu işin önemi bir ışın kılıcı yapmamızı sağlayıp sağlamamasıyla ilgili değildir (bununla hiç ilgisi yoktur). Aksine genel olarak konuşursak, ışın kılıcının ışınını, daha doğrusu ışığını bilgisayarlarda, özellikle de kuantum bilgisayarlarında kullanmaya çalışmanın hayal kırıklığı yaratan yönlerinden biri, fotonların tek

başlarına yaşayan varlıklar olmalarıdır. Birbirlerini görmezden gelir, sanki diğer fotonlar orada değillermiş gibi yanlarından geçip giderler. Gündelik hayatta bu iyi bir şeydir. Burnunuzun dibinde havada olup biten şeyleri bir an durup düşünün. Çevreniz bambaşka yönlerde ilerleyen milyarlarca fotonla kaplıdır. Görmenize (ve bu satırları okumanıza) olanak veren görünür ışık vardır. Radyo, TV, telefon, kablosuz internet, Bluetooth ve diğer pek çok şey tarafından kullanılan radyo dalgaları vardır. Radyatörlerden gelen kızılötesi ışık vardır. Çevrenizi ışınları birbirinin içinden geçip giden bir ışık denizi sarar.

Şimdi bu fotonların birbirleriyle etkileşime girdiğini hayal edin. Optik olarak konuşursak kıyamet kopacaktır. Tüm fotonların bu devasa çarpışmasında görme becerinizi kaybedersiniz ve radyo dalgalarına dayanan teknolojimiz artık bir işe yaramaz. Hoş bir manzara değil. Ancak kubitlerin tamamen izole olmasını istemediğimizden fotonların kontrollü bir şekilde bir kuantum bilgisayarında, hatta elektronlar yerine fotonları kullanan herhangi bir bilgisayarda birbirleri ile etkileşime girmesini sağlamak çok faydalı olacaktır. Bilgisayarın çalışabilmesi için bir miktar etkileşim gereklidir.

Işığı açmak

Bu yolda bir adım atılmıştır bile. Yine 2013 yılında, "ışın kılıcı" deneyinde bulunmuş olanların çoğunun katılmış olduğu bir MIT/Harvard/Viyana Üniversitesi işbirliği, ışığın cihaz tarafından iletilip iletilmeyeceği veya yansıtılıp yansıtılmayacağına tek bir fotonun karar verdiği bir anahtar olan "ışık transistörü"nü üretmişti. Bu aygıt, aralarında donma noktasına kadar soğutulmuş sezyum gazı bulunan bir çift aynadan oluşmaktaydı. Aynalar, bir kuantum etkisi üretecek rezonant

bir boşluk oluşturacak şekilde dikkatlice yerleştirilmişti. Böylece ışık doğrudan aynalardan geçebilecekti. Ancak sezyum gazına tek bir foton gönderirseniz gazın kuantum hali, ışığın neredeyse tamamının geçmesini engelleyecek kadar değişir.

Bu etkiye durumların süperpozisyonundan doğan tüm kuantum becerilerini kullanan tek bir fotonun sebep olması, kuantum bilgisayarları üzerinde çalışanları heyecanlandırmaktadır. Burada karşımıza küçük fakat gerçek bir Schrödinger kedisi çıkar; fotonun kuantum tuhaflıkları, kontrol etmekte olduğu ışık demetine aktarılmaktadır. İlk deney sadece fikri kanıtlamaya yönelik olsa da (gerçek bir bilgisayar, donma derecesine kadar soğutulmuş gazın katı halde bulunan bir dengine ihtiyaç duyacaktır) optik bilgisayar kavramı için değerli bir katkıdır. Ancak muhtemelen optik molekül kadar kayda değer değildir.

Rydberg barikatlarına yerleşmek

Peki "ışın kılıcı" deneyinde olup biten neydi? Bir atomdaki elektronlardan bir veya daha fazlası çok yüksek enerji seviyelerine itildiğinde uyarılan atom bir Rydberg atomu adını alır ve yakınındaki atomları etkileyip onların uyarılarak aynı hale gelmelerini engeller. Eğer deneyde kullanılan ortama iki foton pompalanırsa ilki bu "Rydberg barikatlarından" birini kurar ve ikinci foton, ilk foton ortamdan geçip gidene kadar bekletilir. İki foton birbirine bağlanır ve bir dizi uyarılmış atom ile sırayla etkileşime girerek birbirlerini itip çeker.

Deney, uygulanabilirliğinin daha ilk aşamalarındadır, ancak deneyi yürütenler fotonlardan daha karmaşık yapılar, hatta belki de ışık kristalleri yaratabilme becerisine yol açabileceğini ve bu yapıları kullanarak, bilgisayarların çalışması için gerekli olan mantık kapılarını elektronlar yerine fotonları

kullanarak inşa etmenin mümkün olabileceğini öne sürmektedir. Komik olan şey ise şudur: Bu fotonik moleküllerden, bir ışın kılıcının sabit uzunluktaki titreşen ışık demetinin ötesine geçecek bir şey olabileceğini hayal etmek çok zordur. Yine de ışık ile kuantum seviyesinde daha çok şeyler yapmamıza olanak verecek potansiyeli gerçekten taşıdığından basın açıklamasının yaratmış olduğu heyecan belki de çok hayali değildir.

Optik bilgisayarlar veya Bose-Einstein kondensatları gibi maddenin tuhaf halleri ile veya heyecan verici süperiletkenlik fenomeni ile uğraşırken asla laboratuvar dışına çıkamayacak olan uç noktadaki teknolojilerle çalışıyormuşuz gibi görünebiliriz. Ancak bu görüntü aldatıcıdır. Bu kitapta daha önce de görmüş olduğumuz üzere kuantum fiziği, bilim dünyasından günlük yaşantımıza sızmaya devam etmektedir.

BÖLÜM 13

BİR KUANTUM EVRENİ

Kuantum teknolojisinin olmadığı bir dünya hayal etmeye çalışmak neredeyse anlamsızdır. En temel seviyede bakıldığında her şey atomlara, ışığa ve bunların bir kuantum dansı içerisinde etkileşimlerine dayanmaktadır. Ancak kuantum fiziğini kullanmak yerine etrafından dolaşan elektronik gibi teknolojilerin devreden çıkması halinde modern yaşamımız alt üst olur.

Kuantum teknolojisi

Kuantum teknolojisi ile dolu iMac'imde bunları yazar ve bir kuantum LCD ekranından okurken etrafımda telefonlar (sabit ve mobil hatlar), bir pos cihazı, bir lazer yazıcı, bir CD sürücüsü, hatta bir ışın kılıcı görüyorum (tamam, sonuncusu oyuncak). Kuantum desteği olmaksızın işimi dahi yapamam. Ve son teknoloji ürünü olan kuantum gelişmeleri giderek daha uygulanabilir olup gündelik yaşama kaymaktadır.

Kuantum şifrelemeyi ele alalım. Bu sadece hayal âleminde yaşamakta olan bilim insanlarını, Viyana ile deneysel bağlantıları olan Anton Zeilinger gibi akademisyenleri ilgilendiren bir konu değildir. IBM ve Toshiba gibi büyük, oturmuş bilgi-

sayar şirketlerinden Amerikalı MagiQ ve İsviçreli ID Quantique gibi uzman firmalara kadar pek çok şirketin kuantum anahtar sistemleri üzerinde çalışıyor olduğu gerçeği, bu güçlü kuantum etkisinin pratik kullanımı için gerçek bir potansiyel olduğunu göstermektedir.

Uzayda dolaşıklık

Kuantum anahtarlarını laboratuvarda kullanılan şeylerden gündelik hayatta güvenilir bir şekilde kullanılabilen bir şeye dönüştürmenin esası, internetin (ya da en azından çok bireysel bir internetin) bir kuantum versiyonu gibi bir şeyi kurmaktır. Bunu pratik hale getirmek kuantum anahtarlarını, mesela İngiltere'deki bir bankanın ABD'deki bir banka ile güvenli bir şekilde iletişim kurabileceği şekilde birbirinden uzak konumlara dağıtacak olan bir istasyonlar ağını gerektirecektir. Bu kuantum istasyonları için ideal konum, bir uydunun pek çok olası hedefe rahatça erişme imkânı olmasından ötürü uzaydır. Anton Zeilinger'in Viyana'daki ekibinin, dolaşık fotonları bir uydu ile karşılaştırılabilir mesafelerde binadan binaya göndermek için uğraşmasının sebebi budur. Aynı kanallar, dolaşıklığı kullanarak bir konumdaki kubitleri diğer konumdakilerle bağlayarak farklı birimler halinde dağıtılmış kuantum bilgisayarı kurmak için de kullanılabilir.

Dolaşıklığı kilometrelerce uzaklıktaki mesafelerde canlı tutmak kolay bir süreç değildir. Uzak bir mesafeye gönderilen bir radyo veya lazer sinyali, genellikle çok sayıda fotondan oluşur. Ayrı ayrı fotonların çoğu hava molekülleri tarafından dağıtılarak veya madde ile başka şekilde etkileşime girerek yolda kaybolacaktır. Ancak bir kuantum sinyali, bireysel fotonlar seviyesinde iş görür. Yolda uğranan kayıplar sürece ciddi olarak zarar verebilir. Anahtarın tek bir bitinin

çok sayıda kopyasına sahip olmak mümkün değildir, aksi halde birileri dolaşıklığı bozma gereği duymadan akışın bir kısmını engelleyebilir. Foton, yolunun büyük kısmını etkileşebileceği az miktarda maddenin bulunduğu uzayda aldığından anahtar istasyonları olarak uydular, bu yüzden daha da çekici hale gelir.

Deneysel bir uyduda bir kuantum istasyonu kurmak amacıyla Uluslararası Uzay İstasyonu'nda bir deney düzeneği kurmak için (deney sürerken astronotların süreç üzerinde oynayabilmesi avantajına sahiptir) Anton Zeilinger'in Avrupa Uzay Kurumu ile yapmakta olduğu çalışmadan, Kanada Kuantum Hesaplama Ensitüsü ile Kanada Uzay Kurumu'nun daha önce bahsetmiş olduğumuz Japon uydusunda yaptığı işbirliğine kadar çok sayıda deneme yapılmaktadır. Henüz çok uzakta olsa da, dünyanın iki ucu arasında tamamıyla kırılmaz, kolay iletişime olanak verecek olan uydu bazlı "kuantum örtülü" bir iletişim ağı nihayetinde devreye girecektir.

Ahlaki bir boşluk

Pek çok yeni teknoloji gibi bu olasılık da hem faydalı hem de endişe vericidir. Bunun anlamı finansal işlemlerin tamamen güvenli yapılabilmesi ve bu sürecin mevcut olan açık anahtar/kapalı anahtar sisteminin, kuantum bilgisayarlarındaki Shor algoritması ile büyük asal sayıların çarpanlarına ayrılması ile yok edilmesini önleyecek kadar erken kullanılabileceğidir. İnternette küçük asma kilidin belirdiği internet sitelerinde yaptığımız işlemler yeni nesil uydular aracılığıyla gerçekleştirilecek kuantum anahtar dağılımı uygulamasıyla çok daha güvenli hale getirilebilir. Ancak şifresinin kırılması mümkün olmayan bu iletişim aynı zamanda teröristler ve casuslara hükümetlerce takip edilme korkusu olmadan

haberleşme imkânı verecektir. Güvenlik örgütlerinin şifreli dosyalara erişebilmesi için RSA gibi bir sistem kurulabilir. Bu, kişisel özgürlüklerin bir ihlali gibi gözükebilir ancak bazı durumlarda mazur görülebilir. İyi bir kuantum anahtar dağıtımında arka kapı yoktur. Mesaj ne olursa olsun, tamamen güvenlidir.

Her yeni teknolojide olduğu gibi kuantum fiziği uygulamaları da ahlaki olarak tarafsızdır. Bize belirli beceriler kazandırır ve bu becerilerle ne yapacağımıza karar vermek bize kalmıştır. Ancak ok yaydan çıkmıştır ve artık geri dönüş yoktur.

Kuantum fiziği ve uygulamaları, bazı yönleriyle bilim insanları ve mühendislerin bir nesil önce elektriğe karşı tutumlarına benzerlik gösterir. Elektriğin ne olduğu hakkında hiçbir fikirleri yoktu, ancak elektrik çağının giderek artan faydalarını kullanabilmemiz için elektrikten faydalanabilmişlerdi. Victoria çağında yaşayanları keyiflendiren elektrik etkilerini şimdi çok daha iyi anlıyoruz, ancak kuantum dünyası söz konusu olduğunda, onu anlayacak bir mekanizmadan yoksun olduğumuz için daha da büyük bir bariyere çarpmış gözükmekteyiz. Bir açıdan bakıldığında fizik, kuantum seviyesinde doğanın gerçekliği hakkında asla mutlak bir hakikat ortaya çıkartamayacaktır. Tek yapabileceği, bize modeller sağlamaktır. Nobel Ödülü kazanmış iki büyük fizikçi Richard Feynman ve Steve Weinberg'in kuantum seviyesinde işlerin nasıl olduğuna dair yaptığı yorumlara bir göz atın.

Kuantum parçacığı nedir?

Kitapta görmüş olduğumuz üzere Feynman, "Işığın bu şekilde, parçacıklar halinde geldiğini vurgulamak istiyorum," demişti. Feynman ışık hakkında konuşmaktaydı, ancak diğer

kuantum parçacıkları hakkında da aynı şeyi söylerdi. Öte yandan Weinberg, "Evrenin asıl sakinlerinin alanlar olduğu düşünülmüş (bir elektron alanı, bir proton alanı, bir elektromanyetik alan) ve parçacıklar sadece epifenomene indirgenmiştir," diye yazıyordu.

Daha yaşlı olan Feynman'ın yorumlarının daha eski olduğu ve fikirlerinin yerini Weinberg'in yeni fikirlerinin aldığı düşünülebilir, ancak Feynman'ın parçacık tanımı, Weinberg'in fikirlerini açıklamasından neredeyse on yıl *sonra,* 1985'te yayınlanan bir kitapta yer almıştır. Fizikçi olmayanların Feynman'ın parçacık görüşünü kabul etmesi daha doğal gözükebilir, çünkü bir bütün olarak baktığımızda, duyuladığımız şeyler alan şeklinde değil, parçacık şeklinde gelir. Alanlar gerçek olamayacak zihinsel kavramlar gibi gözükmektedir. Tek bir elektronun konumunu tanımlamak için, görünürde minik bir nesne bulundurmak yerine tüm evreni dolduran bir alan gerekmesi, kulağa müsriflik gibi gelebilir. Ancak modern fizikçilerin büyük kısmı, Weinberg'in haklı olduğunu söyleyecektir. Aslında her ikisi de yanılmıştır veya görüş açınıza göre her ikisi de haklıdır.

Aslında kuantum fenomenini tanımlamanın her iki yolu da gözlemlenen sonuçlara uymaktadır. Ve ikisini ayırmak için elimizde başka bir yol da yoktur. Mesela bir elektrona bakıp onun "gerçekte" ne olduğunu söylememizin bir yolu yoktur. Elimizden gelen tek şey gözlemler yaparak (bunların sayısı çok fazladır) birtakım modelleri test etmek ve bu modellerin ne kadar uygun olduklarına, tahminlerinin gözlemlenen şeylere ne kadar uygun olduğuna bakmaktır. Hem parçacık, hem de alan yaklaşımı, eşit derecede uygundur. Alan yaklaşımı, kullanılan matematiğe daha uygun olduğundan modern fizikçilerce daha çok tercih edilir. Ancak Weinberg,

parçacıkların "sadece epifenomen" olduğunu söylemekte tamamen yanılmıştır. Parçacıklar alanlar kadar gerçektir (ve hayal ürünüdürler).

Karanlıkta tahmin yürütmek

Inventing Reality (Gerçekliği İcat Etmek) adlı kitabında Bruce Gregory, bilim insanının, özellikle de fizikçinin yaptığı işin, kapalı muhafazası içinde duran karmaşık bir saate bakarak dışarda gözlemlemiş olduğumuz sonuçlara içerde hangi mekanizmanın sebep olduğuna karar vermeye çalışmaya benzediğine işaret etmiştir. Belli zamanlarda kadranındaki çeşitli rakamları neden gösterdiğine dair farklı farklı kuramlar üretebiliriz. İçerde kurmalı bir mekanizma olabilir, dışardan gelen bir sinyali alan bir radyo bağlantısı olabilir veya diğer pek çok olasılıktan biri olabilir. Mesela (Discworld kurgusu haricinde pek mümkün olmasa da) içerde kendi kalp atışlarıyla eşzamanlı bir ritim ile bir kolu çeviren bir cüce olabilir. Bilgi, saatin kadranına çok farklı yollar ya da mekanizmalarla ulaşıyor olabilir.

Saatin asla açılamayacağını aklımızda tutarsak yapabileceğimiz tek şey, kuramlarımızın göstergelerde neyin belireceğini tahmin etmekte ne kadar başarılı olduğuna bakmaktır. Kuramlarımızı gözlemler ile karşılaştırabiliriz. Ve gözlemlerle en iyi örtüşen ve gelecekte neler olacağını tahmin etmekte en kullanışlı olanlar, üzerinde çalışmaya devam edeceğimiz kuramlardır. Bazen hepsi aynı sonuçları üreten ve matematiksel olarak birbirlerinin eşdeğeri olduğu gösterilebilen birden fazla kuram bulunacaktır. Eğer durum buysa hangi kuramı kullanacağımız tamamen keyfimize kalmıştır. Matematiği daha kolay olduğundan veya doğal eğilimlerimiz ile daha uyumlu olduğundan bu kuramlardan birini diğerlerine tercih edebili-

riz ancak neler olup bittiğini açıklamak için hangi dili kullanıyor olduğumuz, tamamen kişisel bir tercihtir.

Daha da önemlisi, modellerimizin hakikatin kendisi olduğu fikrinden uzaklaşmamız gerekir. Bir atomun nasıl davrandığını ya da ışık madde ile etkileşime girdiğinde neler olduğunu tanımladığımızda gerçekliği tanımlamış olmayız. Aksine, gözlemlenen sonuca uymakta olan modelimiz hakkında konuşuyor oluruz. Mühürlenmiş saati tekrar göz önüne getirin. Saat, içerisinde kolları çekip çeviren bir cüce olduğundan çalışıyor bile olabilir (öyle olmadığını umarım). Gerçeklik dediğimiz şey bu olabilir. Ancak içerdeki cüce, sanki bir kurma mekanizması varmış gibi hareket ediyorsa ve benim, kurma mekanizması üzerinde yapmış olduğum hesaplamalar, akrep ve yelkovanın nasıl hareket edeceğini tahmin edebiliyorsa, bunun, felsefi bakış açısı hariç, bir önemi yoktur. Bilim felsefeden daha pragmatiktir. Böyle de olmak zorundadır.

Ve bunda bir sorun da yoktur. Eğer bilim insanları zamanlarının tamamını gerçekliğin kalbine ulaşmaya harcıyor olsaydı, kuantum fiziğinden asla faydalanamazdık. Bilim, dış dünyaya hiçbir etkisi olmayan, izole bir disiplin olurdu. Ancak fizikçiler bize, kuantum davranışının tüm tuhaflığından faydalanmamıza olanak verecek kadar gerçekliğe uyan modeller sunmuştur. Metaforik saatin muhafazasını açmayı asla başaramayacak olsak da, başka deyişle, gerçeğin sırrını hiçbir zaman tam manasıyla çözemeyecek olsak da, bu modeller aracılığıyla ondan yararlanabiliriz.

Kuantum parçacıkları ile inşa etmek

Daha yolun başındayız. Kuantum fiziğinin potansiyelinden faydalanmaya daha yeni yeni başlıyoruz. Doğada var olan

hiçbir şeye benzemeyecek şekilde davranan yeni materyaller üretmek için kuantum tecrübemizi kullanmak mümkündür. Bilimadamları "insanoğlunun daha önce bilmediği" çok güçlü veya mucizevi yeni elementlerden söz eden kötü bilimkurgulara burun kıvırmaktadır çünkü elementler ve periyodik cetveldeki olası boşluklar hakkında çok şey biliyoruz, ancak fizikte yeni materyallere ayrılmış olan saha çok daha büyük boşluklar içermektedir.

Maddenin üç basit haline alışkınızdır: gaz, sıvı ve katı. Fizikçiler plazma (elektron kazanacak veya kaybedecek kadar ısıtılarak bir iyon kümesi haline gelen madde) ve Bose-Einstein kondensatını ekleyerek bu sayıyı beşe çıkartırlar. Ancak Cambridge'de Cavendish Laboratuvarı'nda Kuantum Madde Grubu'nun başkanı olan Malte Grosche'un işaret ettiği gibi, bu alanda fizik ile kimya arasında ilgi çekici bir paralellik vardır.

Kimyacıların oynayabilecekleri sadece 100 kadar elementleri vardır. Ancak iş bileşiklere (elementleri birleştirmenin farklı yollarına) geldiğinde sodyum klorür gibi iki atomluk basit türlerden kromozomlarımızı oluşturan devasa DNA moleküllerine kadar olasılıklar sınırsızdır. Elektronların kendi kendilerini organize etmelerinin bir materyalin doğasını dönüştürmesine benzer şekilde, kuantum metodolojisi kullanılarak maddenin yeni hallerini üretmek mümkündür.

Grosche'un üretmiş olduğu, kulağa egzotik gelen listenin neleri değiştireceğini tahmin etmek zordur ve bunun için henüz erkendir. "Dönüş veya yük Pomeranchuk düzeni gibi alışıldık olmayan parçacık-delik kondensatları" ve "kiral mıknatıslardaki skirmion örgüler, döngüsel buz materyallerindeki manyetik tekkutuplar ve topolojik yalıtkanlar"dan bahsetmektedir. Bunlar kulağımıza kalitesiz bir bilimkurgu

romanı ya da filminde karşımıza çıkabilecek bir uzay gemisinde bulunan cihazlarmış gibi gelebilir, ancak gerçektirler ve henüz hayal edemediğimiz kuantum cihazları ve materyalleri için yeni yapıtaşları oluştururlar.

Kuantum etkilerini görmek

Ayrıca kuantum etkilerinin "makro" nesnelere, görebileceğimiz ve etkileşime girebileceğimiz şeylere doğru sızmasına dair giderek artan sayıda örnek görmekteyiz. En meşhur olanlar, görmüş olduğumuz süperiletkenlik gibi fenomenlerdir, ancak belki de en tuhaf örnek, 2005 yılında Paris Diderot Üniversitesi'nde yürütülen bir deneyde ortaya çıkmıştır. Yves Couder ve Emmanuel Fort, yağ dolu bir küveti, yağ kütlesinde dikey titreşimler üreten bir platformun üzerine koymuştu. Daha sonra küvete gözle görülebilecek kadar büyük yağ damlaları damlatmışlardı. Öğrencilerin bir gece partisinden sonra akıllarına gelen türde bir deney gibi gözükebilir, ancak sonuçlar şaşırtıcı olmuştu.

Bariz olan beklenti damlaların yağ kitlesi içinde titreşimlerin yardımı ile dağılıp gitmesiydi, ancak birer bütün olarak kalmış, yüzeyde aşağı yukarı sıçrayarak dalgacıklar üretmişlerdi. Deneyi yürütenler gücü artırdığında damlacıklar dalgalar üzerinden sıçramaya başlamış, küvetin çeperlerine gelmeden yön değiştirip geri sıçramışlardı. Couder ve Fort hareketli damlalara "yürüyenler" adını vermişler (damlalar sanki canlıymış gibi davranıyorlardı) fakat aynı zamanda kuantum dünyası ile açık bir benzerlik de fark etmişlerdi. Sıçrayan damlacıklar ile onları iten dalgalar arasında bir tür uyum vardı. Bu bir çeşit görünür dalga/parçacık ikiliğiydi.

Couder ile Fort, beklendiği üzere "yürüyenleri" ile deneylerine devam etti ve kuantum dünyası ile tek benzerliklerinin

bu olmadığını buldu. Young yarıkları deneyinin bir versiyonunu yağ ortamında tekrarlamayı başardılar. Bu deneyde tek tek parçacıklardan oluşan bir dizi, bir yarıktan geçen damlanın her iki yarıktan da geçen dalgalar ile etkileşime girdiği bir girişim motifi oluşturuyordu. Ve Niels Bohr'u kuantum kuramını oluşturma yoluna itmiş olan enerji içeren yörüngelerin damlacık versiyonlarını gözlemlemişlerdi.

Yürüyenler tam olarak, dalga/parçacık ikiliğinin, gözlemlenmiş olan dalga-benzeri davranışa sebep olan bir "pilot dalga"ya eşlik eden gerçek parçacıklardan ortaya çıkmış olduğunu düşünen Louis de Broglie'nin fikirlerini yansıtmaktaydı. Paris deneylerindeki yağ damlacıkları yağ küvetinin yüzeyindeki pilot dalgalar tarafından pek çok açıdan yönlendirilmekteydi. Pek az fizikçi bu deney ile kuantum fiziği arasında doğrudan bir bağlantı olduğuna (bunun gerçek bir kuantum etkisi olduğuna) inanmaktadır, ancak çoğu fizikçi kuantum etkilerinin altında yatan süreçler ile aynı fenomene doğrudan dayanmasa da bu deneyi, neler olup bittiğine dair mükemmel bir analog model sağlayan zarif ve eğlenceli bir paralel olarak görmektedir.

Kuantum fenomeninin bu türü ile alışılmış olan versiyonu arasında kesinlikle bazı açık farklar mevcuttur. Kuantum parçalarının "pili bitmez". Bir etkileşim olmaksızın sonsuza kadar çalışmaya devam ederler, ancak yağ küvetindeki dalgalar, titreşim kaynağından gelen enerji ile sürekli olarak beslenmelidirler. Paris deneyindeki dalgalar iki boyutla sınırlı iken her bir kuantum parçacığı, kendi üç boyutunda olasılık dalgalarına sahiptir (yani iki parçacık altı boyut gerektirir ve böyle devam eder gider). Boyutlardan oluşan bu bağımsız set, dolaşıklığın işlev görmesi için hayati gözükmektedir, yani yürüyenlerin kuantum fenomenlerinin en hayati olanlarını göstermesi pek olası gözükmemektedir.

Modele âşık olmak

Kuantum fiziğinin tuhaflıklarını ve modeller ile gerçeklikler arasındaki ayrımı yanlış anlamak, profesyoneller için bile kolay olabilir. Hatta pek çok bilim insanı, modellerinin aslında gerçek olmadığını hatırlamakta zorlanır. Leonard Mlodinow ile birlikte yazmış olduğu kitabı *Büyük Tasarım*'da Stephen Hawking, bir zamanlar felsefenin yanıtlaması beklenen soruları artık bilim yanıtladığından felsefenin artık öldüğünü iddia etmişti. Ancak bu iddia, yazarın bilimin doğası hakkında çok naif bir fikre sahip olduğuna işaret etmektedir. Bilim insanları, bilim felsefesi hakkında bir miktar çalışmaya zorlanırlarsa aslında ne yaptıkları hakkında çok daha iyi bir fikir sahibi olabilirler.

Mesela kuantum parçacıklarının aynı anda birden fazla yerde olabilmesine olanak veren Brian Cox'u ele alalım. Kendisinden önceki bölümlerde de söz ettiğimiz Cox bilimi popülerleştirmek konusunda çok iyi bir iş çıkarmaktadır: Cox örneğini sadece modeller ve kuantum kuramı hakkında konuşulurken ne kadar kolay yanlış yapılabileceğini göstermek için veriyorum. Kitaplarının birinde (Jeff Forshaw ile birlikte yazmış olduğu kitabında) Cox "Kuantum kuramı, keşfedecek olduğumuz üzere, büyük tahmin ve keşif gücü olan ... bir Doğa tanımı içermektedir," diyordu. Görmüş olduğumuz gibi kuantum kuramı Doğa'nın ne yapacağını anlamamıza ve doğa hakkında edindiğimiz bilgileri elektronikten lazerlere kadar her alanda kullanmamıza çok yardımcı olur. Ancak kuantum kuramı doğayı *tanımlamaz*. Tanımlayamaz. Elinden gelen tek şey doğa üzerinde yapabileceğimiz gözlemler hakkında kestirimlerde bulunmaktır ve bu da çok farklı bir şeydir.

Kuantumun cazibesinden kaçınmak

Kuantum kuramının "gerçeklik" ile değil, sadece modeller ile ilgili olduğunun farkında olmanın yanı sıra, bunun tersi bir etkinin çekici çağrısına karşı da dikkatli olmalıyız. Kuantum gözlemlerini "makro" dünyaya taşımaya dönük, kısmen postmodernizmin aşırılıklarından etkilenmiş olan bir eğilim mevcuttur: Mesela Belirsizlik İlkesi'nin "her şeyin belirsiz olduğu" anlamına geldiğini düşünmek ya da kuantum kuramının gizemli bir niteliği olmasının, gizemli görünen ve içine birkaç kuantum terimi atılmış olan her düşüncenin doğru olduğunu varsaymak. Ancak bu, durumu tamamen yanlış anlamak demektir.

Evet, sadece modeller ile çalışıyoruz. Evet, kuantum fiziğinin doğayı tanımlamıyor olduğu, mevcut veriler girildiğinde gözlemlenecek şeyin ne olduğunu tahmin etmenin en iyi yolu olduğu doğrudur. Ancak terminolojiyi hafife alanlar, kuantum fiziğinin bu işte çok iyi olduğunu unutmaktadırlar. Kuantum fiziği gerçeklik ile çok çok iyi örtüşen tahminler yapar, öyle ki Londra ile New York arasındaki mesafeyi bir saç telinin kalınlığı kadar yanılma payıyla tahmin etmeye benzer sonuçlara ulaşır. Kuantum kuramı, altta yatan bir gerçeklik olmadığından sadece olasılıklara dayanan tahminler yapabileceğimizi söylese dahi, bu bulanık bir terminoloji değil, kestirimsel kesin matematiksel değerlerdir.

Bütün kuramlar becerileri ve değerleri açısından eşit değildir. Araya "kuantum" gibi kelimeler katarak kurgusal fantezileri, gerçekliği modellemeye yaklaşan herhangi bir şeye çevirmek de mümkün değildir. Suyu sihirli bir şekilde "hidratlamak için gereken özel bir dengeye geri getirecek şekilde" dönüştüren ya da özel "enerji alanlarını" kullanan veya bir ürünün bilimsel bir temeli varmış hissini uyandırmak için

reklamlarını meşru fiziksel terimlerle süsleyen "kuantum" cihazları internette cirit atmaktadır.

Yeni gerçeklik

Sadece bilim terminolojisini, özellikle de kuantum fiziğini kullanmak, bir şeyi geçerli veya faydalı yapmaz. Ancak bu amaçla en çok kuantum terminolojisinin kullanılıyor olması, bir açıdan da şaşırtıcı değildir. Bunun en basit sebebi, kuantum fiziğinin günlük yaşamımızda çok önemli bir yer tutmasıdır. Bu tür isabetsiz terminoloji kullanımları geçmişte bazı primitif toplumların yarattığı kargo kültlerini andırmaktadır. Kargo kültleri bu primitif toplumların kendileriyle temas kuran teknolojik toplumların dış görünüşlerini, uygulamalarını ve araç-gereçlerini kopyalamaya çalışıp sahtelerini inşa etmeleriyle ortaya çıkıyordu. Kuantum terminolojisinin bu yanlış kullanımı da Richard Feynman'ın deyimiyle bir kargo kültüdür. Tek başına saçmalıktan ibarettir ama yine de kuantum fiziğinin yaşamlarımızda ne denli önemli bir yer işgal etmeye başlamış olduğunu vurgulamaktadır.

Kuantum Çağı'na hoş geldiniz.

TEŞEKKÜR

Yardımı ve desteği için editörüm Duncan Heath'e ve bana bilgi veren, yardım eden herkese teşekkür ederim. Kim olduğunuzu biliyorsunuz.

Burada adını anmak istediğim bir kişi, kitapları beni büyüleyen ve kuantum kuramını, kafa karıştırıcı bir gizemden heyecan verici bir meydan okumaya dönüştüren merhum Richard Feynman'dır.

DİZİN

A

amonyak 130, 131, 132

ampul 63, 78, 115, 116, 144, 145, 148, 153, 230

Analitik Motor 219, 224

Arşimet 123, 150

atom 13, 14, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 35, 36, 38, 39, 44, 47, 58, 59, 60, 61, 66, 67, 75, 79, 96, 110, 112, 124, 129, 130, 131, 134, 135, 136, 140, 143, 150, 154, 164, 165, 170, 173, 175, 176, 177, 181, 182, 191, 215, 231, 232, 235, 240, 243, 245, 246, 248, 249, 253, 255, 261, 262

atom bombası 98

B

Babbage, Charles 217, 218, 219, 220, 224, 229

Belirsizlik İlkesi 31, 206, 266

bilgisayar 16, 48, 61, 63, 64, 65, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 79, 81, 117, 123, 125, 159, 160, 162, 202, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 249, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257

Bohr, Niels 22, 23, 24, 26, 27, 58, 60, 110, 164, 203, 204, 205, 264

Born, Max 29, 31, 204

bozon 187, 244, 245, 246

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 112, 163, 187

C

Cerenkov radyasyonu 248

Churchill, Winston 219, 220, 226
Cooper çiftleri 178, 179, 182

D

Dalton, John 22
Darwin, Charles 37, 38
Davy, Humphry 53, 54
de Broglie, Louis 26, 27, 264
de Saussure, Theodore 45
Descartes, René 85, 86, 88, 89
Dirac, Paul 26, 27, 96, 97, 245
direnç 65, 88, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 179, 182, 184, 187, 188, 193, 201, 244
DNA 41, 42, 43, 95, 166, 262

E

Edison, Thomas 115, 116
Einstein, Albert 9, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 93, 94, 96, 110, 129, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 232, 245, 247, 248, 250, 251, 254, 262
elektrik 10, 11, 21, 23, 24, 29, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 70, 73, 74, 75, 77, 78, 80, 81, 82, 92, 93, 94, 111, 116, 121, 122, 126, 128, 140, 144, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 179, 182, 187, 188, 189, 190, 192, 194, 195, 201, 202, 222, 223, 232, 241, 250, 258
elektrik iletimi 60
elektromanyetik dalga 59, 93, 95
elektromanyetizma 25, 56, 112, 178, 184
elektron 13, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 33, 34, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 51, 52, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 74, 75, 76, 79, 80, 96, 99, 102, 108, 110, 116, 119, 121, 124, 125, 129, 131, 133, 142, 143, 144, 150, 155, 163, 164, 165, 169, 171, 172, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 185, 197, 223, 232, 235, 240, 245, 246, 248, 251, 252, 253, 259, 262
elektronik 11, 61, 64, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 80, 116, 123, 125, 126, 128, 145, 185, 199, 202, 208, 222, 229, 255, 265
enerji depolama 202

ENIAC 63, 64, 65, 234
Enigma 212
enzim 41
evrim 37, 39, 220

F

Faraday, Michael 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 81, 91, 92, 93, 94, 110, 111, 130, 174
Fark Motoru 218
faz 66, 100, 103, 104, 106, 107, 109, 110, 118, 119, 120, 121, 129, 146, 148, 150, 154, 156, 165, 187, 197, 249
felsefe 51, 53, 261, 265
fermion 245, 246
Feynman, Richard 14, 15, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 209, 258, 259, 267, 269
fonon 177, 179, 181, 183
fosfor 68, 74, 75, 76, 79, 233
fotoelektrik etki 19, 21, 22, 59, 94, 121
foton 13, 22, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 46, 77, 80, 83, 95, 96, 99, 100, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 124, 125, 126, 129, 130, 143, 148, 150, 155, 156, 158, 164, 165, 176, 177, 209, 210, 230, 231, 232, 235, 239, 245, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 256, 257
fotosentez 37, 44, 45, 121

G

Galileo Galilei 19, 86, 93, 123
Genel Görelilik 9, 129, 178, 205
gluon 112, 113
görelilik 9, 15, 19, 93, 129, 178, 205, 207, 208
göz 29, 46, 47, 83, 84, 85, 86, 88, 95, 119, 120, 121, 124, 125, 145, 146, 150, 151, 162, 263
gradyan 191, 199
Güneş 10, 11, 21, 25, 26, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 46, 82, 83, 84, 93, 109, 121, 122, 124, 125, 136, 148, 150, 167, 189, 195, 202
güneş sistemi 24, 25, 26

H

hafıza kartları 73
Hawking, Stephen 265

hayali sayılar 27, 29
Heisenberg, Werner 26, 27, 31, 204
helyum 39, 40, 140, 143, 147, 170, 171, 181, 182, 187, 191, 193, 243, 244, 246, 247
Herschel, John 217
hidrojen 23, 25, 26, 38, 39, 40, 42, 43, 60, 191
hologram 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162
Hooke, Robert 88
Huygens, Christiaan 17, 89

I-İ

ısı 38, 39, 61, 62, 63, 93, 135, 144, 149, 173, 187, 239, 244
ışık 9, 10, 11, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 27, 30, 35, 36, 37, 44, 45, 46, 47, 51, 59, 60, 67, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 110, 112, 115, 116, 117, 119, 121, 122, 124, 125, 126, 127, 129, 130, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 149, 150, 152, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 184, 187, 195, 203, 207, 235, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 258, 261
ışın kılıcı 251, 252, 253, 254, 255
iletken 11, 59, 60, 61, 62, 66, 67, 79, 92, 121, 168, 170, 173, 174, 175, 179, 181, 183, 197, 244
ivme 164
iyon 39, 40, 79, 178, 189, 190, 232, 234, 240, 262
izotop 39, 98, 177, 246

J

jiroskop 246

K

karmaşık sayı 28, 113
katot ışını 75, 76
Kelvin, Lord (William Thomson) 15, 16, 37, 38, 39, 170
Kelvin ölçeği 170
kırılma 88, 104, 107, 184, 213
klorofil 45

kondensat 179, 232, 245, 247, 248, 249, 250, 251, 254, 262
kuantum 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 56, 60, 66, 71, 72, 73, 74, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 108, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 124, 126, 128, 148, 157, 159, 163, 165, 168, 170, 175, 176, 177, 179, 189, 191, 195, 196, 197, 198, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 245, 246, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 269
kuantum bilgisayarı 216, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 252, 256
kuantum dolaşıklığı 196, 207, 213, 214, 215, 230, 248
kuantum tünellemesi 41, 74, 237
kuark 112

L

lazer 11, 46, 128, 129, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 159, 162, 163, 168, 176, 188, 198, 210, 249, 250, 255, 256, 265
LCD 76, 77, 78, 79, 125, 126, 209, 255
LED 79, 125, 154
lens 85, 119, 120, 121, 124

M

madde 11, 13, 15, 22, 32, 35, 38, 44, 61, 66, 67, 68, 77, 78, 82, 83, 89, 91, 92, 94, 95, 96, 99, 110, 115, 121, 122, 124, 126, 133, 143, 164, 169, 170, 176, 177, 178, 180, 184, 185, 187, 188, 196, 201, 216, 233, 245, 246, 247, 248, 249, 251, 254, 256, 257, 261, 262

maglev trenleri 193, 194, 195
Manhattan Projesi 98
manyetik alan 46, 47, 92, 94, 171, 173, 174, 175, 188, 190, 191, 195, 198, 199, 201
manyetizma 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 92, 111, 174, 193
matris 27, 78, 121, 126
Maxwell, James Clerk 56, 57, 58, 92, 93, 174
mazer 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 140, 141, 146, 147, 148
metal 21, 59, 60, 61, 65, 66, 68, 81, 85, 94, 96, 121, 128, 133, 134, 137, 142, 145, 158, 169, 170, 172, 173, 174, 179, 180, 182, 185, 189, 198, 201, 235
metamateryal 184, 185
mutlak sıfır 168, 170, 173, 190, 233, 250

N

Newton, Isaac 17, 86, 87, 88, 89, 116, 117, 123, 169
nötron 112, 177, 246
nükleer füzyon 10, 39, 152, 153, 183, 189

O-Ö

oksijen 37, 38, 40, 43, 44, 45, 124, 144, 150, 179, 180, 182
olasılık 26, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 40, 43, 46, 47, 48, 49, 97, 98, 100, 103, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 117, 118, 119, 120, 121, 124, 126, 137, 138, 143, 144, 177, 179, 180, 183, 197, 202, 203, 204, 206, 207, 214, 215, 217, 223, 224, 227, 228, 230, 232, 235, 257, 260, 262, 264, 266
optik depolama 72, 159
Öklid 8, 84
Özel Görelilik 19, 208

P

Penrose, Roger 47, 113
Planck, Max 16, 18, 19, 21, 22, 94, 110
plazma 78, 79, 189, 190, 262
postmodernizm 266
Priestley, Joseph 44, 45
prizma 87, 88
programlama 219, 226, 232
proton 25, 39, 40, 41, 43, 112, 177, 187, 191, 246, 259

R

radyasyon 95, 132, 163, 191, 194, 248
radyo 30, 62, 64, 65, 81, 83, 95, 130, 191, 194, 208, 213, 231, 252, 256, 260
Rutherford, Ernest 24

S-Ş

Schrödinger, Erwin 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 40, 111, 204, 207, 253
ses 62, 71, 89, 90, 122, 127, 180, 184, 191, 193, 194, 204
Sezar şifresi 212
Sinek (film) 214, 216
statik elektrik 51
süperakışkan 243, 244, 245, 246, 247, 249
süperiletken 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 235, 243, 245, 251, 254, 263
sürtünme 169, 170, 193, 243
şifre 63, 211, 212, 213, 220, 225, 226, 239, 255, 257, 258

T

taşınabilir bellek 72, 73, 74
Tesla, Nikola 116
transistör 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 78, 126, 133, 134, 176, 188, 221, 222, 229, 252
Turing, Alan 219, 220, 221, 222, 229

U

uranyum 98, 177
uzay 36, 37, 76, 83, 85, 86, 89, 91, 97, 109, 110, 113, 124, 211, 214, 239, 247, 256, 257, 263
uzay yolculuğu 208
Uzay Yolu (Film) 214

W

Weinberg, Steve 258, 259

X

X-ışını 83, 155, 165, 167

Y

yakut 134, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149

yalıtkan 61, 66, 67, 74, 185, 197, 262

yarıiletken 21, 66, 67, 68, 79, 81, 121, 154

yavaş cam 247, 250

yörünge 24, 25, 26, 27, 38, 75, 110, 124, 264

Young yarıkları 17, 18, 31, 32, 33, 118, 264

Kuantum fiziği sayesinde gündelik hayatımızda bilgisayarlar, akıllı telefonlar, lazer cihazları ve MR tarayıcılarından faydalanıyoruz. Peki, bu yeni fizik bize yakın gelecekte neler vaat ediyor? Saatte 1000 km hızla yol alabilen trenlerle yolculuk etme; devletlerin dinlemesine takılmadan özgürce haberleşme; radyoaktif atık yaratmayan çevre dostu nükleer enerji üretme; doğayı mahveden barajlar yerine süperiletken bobinlerle enerji depolama; gün ışığını yavaşlatarak geceleri gündüze çevirme ve ışıktan hızlı iletişim kurma imkânı... Bütün bunlar hayal ya da bilimkurgu değil! Kuantum fiziği!

Peki, nedir bu kuantum fiziği? En basit yanıt şu: Atom, elektron ve foton gibi parçacıkların davranışlarını inceleyen bilim. Clegg bilim insanlarının bu parçacıkların davranışlarının gizemini tam olarak çözemediklerini ama geliştirdikleri modeller sayesinde insanlığın hizmetine pek çok teknoloji verdiklerini belirtiyor ve bilim insanları ile bilim meraklılarına küçük bir de uyarıda bulunuyor: "Kendi modelinize âşık olmayın." Çünkü bilim dünyasında her şey çok hızlı değişiyor. Bu kitap değişime ayak uydurmak için size harika bir fırsat sunuyor.

"Bu, Clegg'in yazdığı en iyi kitap."
—John Gribbin

"Kuantum fiziği ve gündelik hayata etkisi hakkında keyif alarak okuyabileceğiniz bir kitap arıyorsanız *Kuantum Çağı* tam size göre."
—BBC Focus

TMG 406377 EZS 6077 EZS

internet satış:
saykitap.com
20 TL
ISBN 978-605-02-0527-5
9 786050 205275
SAY YAYINLARI

Popüler Bilim